

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



Μελέτη και Σχεδίαση Ενισχυτή Τάξης AD  
Study and Design of a Class AD audio amplifier

**Διπλωματική Εργασία**  
**Γιαγκουδάκης Δ. Τιμολέων**

**Επιβλέποντες: Σταμούλης Γεώργιος**  
Καθηγητής  
**Πλέσσας Φώτιος**  
Επίκουρος Καθηγητής υπό διορισμό

**Βόλος, Σεπτέμβριος 2013**



Διπλωματική Εργασία για την απόκτηση Διπλώματος Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα Πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων

.....  
Γιαγκουδάκης Τιμόλεων  
Διπλωματούχος Μηχανικός Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Copyright © Giagoudakis Timoleon, 2013  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος .All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό.  
Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.  
Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.





Στην οικογένειά μου

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσης εργασίας που σηματοδοτεί και το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα από τα άτομα που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Φώτη Πλέσσα που ως επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας μου με βοήθησε με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του. Καθ' όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου με στήριξε προτείνοντας μου λύσεις στα καθημερινά προβλήματα που προέκυπταν, ακούγοντας τις ιδέες και τις προτάσεις μου, δείχνοντας ταυτόχρονα ιδιαίτερη εμπιστοσύνη στη δουλεία μου. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον έτερο επιβλέποντα καθηγητή μου τον κύριο Γεώργιο Σταμούλη για την προθυμία του να αναλάβει την επίβλεψη της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη υποστήριξη και κατανόηση που μου έδειξαν τόσο κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσης εργασίας όσο και κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Γιαγκουδάκης Τιμολέων  
Βόλος, 2013

## Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής υπήρξε η μελέτη της ενίσχυσης των ακουστικών συχνοτήτων. Ειδικότερα έγινε ανάλυση μιας νέας μεθόδου ενίσχυσης με την χρήση δύο ενισχυτικών τάξεων, της τάξης A και της τάξης D, συνδυάζοντας με αυτόν τον τρόπο την υψηλή πιστότητα της πρώτης με την υψηλή απόδοση της δεύτερης. Τέλος, έγινε υλοποίηση με την χρήση διακριτών στοιχείων της πρώτης ενισχυτικής βαθμίδας και πραγματοποιήθηκαν διάφορες μετρήσεις για τον έλεγχο της επίδοσης της.

## Abstract

The main objective of this thesis is the basic study of audio amplifiers. Furthermore, the analysis of the class AD architecture, based on two power amplification classes (class A and class D), is presented which combines the high fidelity of the former with the high efficiency of the latter. Finally, the first stage of the amplifier has been implemented using discrete components. Measurement results are also provided.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	5
Περίληψη.....	6
Abstract .....	7
Περιεχόμενα .....	8
1. Εισαγωγή .....	11
2. Βασικές αρχές ενισχυτών ήχου .....	12
2.1 Τι είναι ενίσχυση .....	12
2.2 Ακουστικός ενισχυτής ισχύος .....	12
2.3 Απαιτήσεις από έναν ενισχυτή .....	12
2.4 Ενισχυτές ac-coupled και dc-coupled .....	13
3. Ενισχυτής Τάξης A .....	15
3.1 Εισαγωγή .....	15
3.2 Στάδια Ενισχυτή .....	15
3.3 Στάδια Εξόδου .....	16
3.4 Θεωρητική Ανάλυση .....	17
3.4.1. Αντίσταση εισόδου .....	18
3.4.2. Υπολογισμός Κέρδους Τάσης Ανοικτού Βρόχου .....	18
3.4.3. Αντίσταση Εξόδου .....	18
3.4.4. CMRR .....	19
3.4.5. DC ανάλυση .....	19
3.4.6. Ανάδραση .....	20
3.5 Ανάλυση Κυκλώματος .....	21
3.5.1. Περιγραφή κυκλώματος .....	21
3.5.2. Υπολογισμός Βασικών Παραμέτρων .....	27
4. Ενισχυτής Τάξης D .....	29
4.1 Εισαγωγή .....	29
4.2 Pulse-Width Modulation (PWM) .....	29
4.3 Ενισχυτής τάξης D .....	30
4.4 Διάταξη Mosfet του σταδίου Ισχύος .....	31
4.4.1. Νεκρός χρόνος .....	33
4.4.2. Ενέργεια επιστρεφόμενη από τον ενισχυτή .....	34
4.5 Κύκλωμα .....	36
5. Ενισχυτής AD .....	38
5.1 Εισαγωγή .....	38

5.2	Δομή ενισχυτή AD .....	38
5.3	Προσομοιώσεις στο PSpice.....	39
6.	Σχεδίαση και κατασκευή πλακέτας ενισχυτή τάξης A.....	44
6.1.1.	Σχεδίαση του Layout του ενισχυτή .....	44
6.1.2.	Κατασκευή της πλακέτας .....	51
7.	Μέτρηση ενισχυτή τάξης A στο εργαστήριο .....	55
	Βιβλιογραφία.....	61
	Ξένη.....	61
	Ελληνική .....	61
	Διαδίκτυο .....	61





## 1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική, που εκπονήθηκε κατά τις προπτυχιακές μου σπουδές στο τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, πραγματεύεται την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων σε τοπολογία AD. Στην τοπολογία αυτή συνδυάζεται ένας ενισχυτής τάξης A και ένας ενισχυτής τάξης D, εκμεταλεύοντας με αυτόν τον τρόπο τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών τοπολογιών.

Ο ενισχυτής τάξης A υλοποιείται από μία κλασική τοπολογία τριών σταδίων στην οποία η βαθμίδα εξόδου είναι κατάλληλα πολωμένη έτσι ώστε τα τρανζίστορ να βρίσκονται στην πιο γραμμική περιοχή λειτουργίας τους και να άγουν συνεχώς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγάλη κατανάλωση και έτσι η απόδοση του να είναι αρκετά μικρή. Παράλληλα η χρήση ολική ανάδρασης τον κάνει να παρουσιάζει ελάχιστη παραμόρφωση.

Στον ενισχυτή τάξης D το σήμα μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό με την χρήση ενός PWM διαμορφωτή και στην συνέχεια το σήμα μετατρέπεται και πάλι σε αναλογικό στο στάδιο εξόδου με την επίπτωση ότι σε αυτό προστίθεται θόρυβος ο οποίος θα πρέπει να αφαιρεθεί. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιείτε κατάλληλο φίλτρο το οποίο όμως δεν καταφέρνει να αφαιρέσει τον θόρυβο σε όλη του την έκταση.

Στην τοπολογία λοιπόν αυτή ο ενισχυτής τάξης A χρησιμοποιείται για να καθορίσει το επίπεδο της τάσης στην έξοδο, ενώ ο ενισχυτής τάξης D για να καθορίσει το ρεύμα. Ο συνδυασμός αυτός μας δίνει την μέγιστη απόδοση με την ελάχιστη παραμόρφωση.

Στο κεφάλαιο 2 εξηγείται η χρησιμότητα των ενισχυτών ήχου και ταυτόχρονα παρουσιάζονται διάφορα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται βήμα βήμα η ανάλυση της δομής και της λειτουργίας του ενισχυτή τάξης A.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μία ανάλυση τη PWM διαμόρφωσης και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του ενισχυτή τάξης D.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται η ένωση των δύο προηγούμενων ενισχυτών και δίνονται διάφορα αποτελέσματα προσομοιώσεων.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η σχεδίαση του Layout της πλακέτας του ενισχυτή τάξης A καθώς και περιγραφή της κατασκευής της αντίστοιχης πλακέτας.

Στο κεφάλαιο 7 δίνονται οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο πάνω στην πλακέτα του ενισχυτή τάξης A καθώς και διάφοροι υπολογισμοί.



## 2. Βασικές αρχές ενισχυτών ήχου

### 2.1 Τι είναι ενίσχυση

Όλα τα ακουστικά σήματα που αποτελούν έξοδο από κάποιο μουσικό όργανο, την κεφαλή από το κασετόφωνο ή από το μάτι του λείζερ στα CD έχουν πλάτος μερικά milivolt. Για να μας είναι χρήσιμα αυτά τα σήματα θα πρέπει να τους αυξήσουμε το πλάτος. Αυτό είναι που ονομάζουμε ενίσχυση. Συνήθως μια τέτοια ενίσχυση γίνεται από τους προενισχυτές που βρίσκονται στο εσωτερικό των πλήρη ενισχυτών και πραγματοποιούν μια ενίσχυση τάσης του σήματος φτάνοντας το στην στάθμη γραμμής που είναι περίπου 1 V RMS. Στη συνέχεια, όταν μιλάμε για έναν πλήρη ενισχυτή το σήμα αυτό οδηγείται στον ενισχυτή ισχύος ο οποίος θα ενισχύσει το σήμα αυτό τόσο στην τάση όσο και στο ρεύμα του και θα το φέρει σε τέτοιο επίπεδο που θα μπορεί να οδηγήσει ένα χαμηλής εμπίδησης ηχείο.

Στο εσωτερικό των προενισχυτών αυτών μπορεί να υπάρχουν επιπλέον κυκλώματα τα οποία προσαρμόζουν το σήμα εξόδου στις απαιτήσεις του χρήστη. Έτσι, υπάρχουν κυκλώματα για την ρύθμιση του τόνου, ισοσταθμιστές, φίλτρα και διάφορα άλλα κυκλώματα τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν, ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη.

Τέλος, ένας καλός ενισχυτής ήχου θα πρέπει να είναι «διαφανής». Αυτό σημαίνει ότι το σήμα στην έξοδο θα πρέπει να είναι ίδιο με το σήμα στην είσοδο όσον αφορά την φάση του, την συχνότητα του, τις αρμονικές του και γενικά σε όλα τα χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν ένα σήμα. Η μόνη διαφορά μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου θα πρέπει να είναι η αύξηση του πλάτους του στο δεύτερο. Οποιαδήποτε άλλη αλλαγή αποτελεί παραμόρφωση του σήματος κατά την ενίσχυση.

### 2.2 Ακουστικός ενισχυτής ισχύος

Από πολύ παλιά οι άνθρωποι προσπάθησα να κατασκευάσουν ενισχυτής ήχου για να μπορέσουν να ενισχύσουν τα σήματα ήχου που διέθεταν. Χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσε κανένας από τους μεγάλου τραγουδιστές να ακουστεί σε ένα σχετικά μεγάλο πλήθος ακροατών. Έτσι το 1950 ο μεγαλύτερος ενισχυτής ισχύος ήταν περίπου 80 Watts RMS για φορτίο 8 Ohm και χρησιμοποιούνταν κυρίως στα θέατρα. Την εποχή αυτή βέβαια οι ενισχυτές ήταν οι γνωστοί λαμπάτοι ενισχυτές μια και δεν είχαν ανακαλυφθεί ακόμη τα τρανζίστορ.

### 2.3 Απαιτήσεις από έναν ενισχυτή

Κατά την σχεδίαση ενός ενισχυτή ισχύος ορίζονται κάποιες προδιαγραφές που πρέπει να έχει ο ενισχυτής. Σίγουρα ένα από αυτά είναι η μέγιστη ισχύς εξόδου του ενισχυτή. Εκτός αυτού όμως μας ενδιαφέρει και η ποιότητα του, η αξιοπιστία του καθώς και το πόσο ασφαλής είναι.

Όσον αφορά την ισχύ εξόδου του ενισχυτή λαμβάνουμε υπόψη την χρήση για την οποία προορίζεται ο συγκεκριμένος ενισχυτής, καθώς και το κόστος το οποίο αυτό συνεπάγεται. Όσο μεγαλύτερη ισχύ εξόδου έχουμε τόσο μεγαλύτερη ισχύ απαιτείται από πλευράς μετασχηματιστών τροφοδοσίας. Επίσης, με την αύξηση της ισχύς αυξάνεται και η θερμοκρασία των τρανζίστορ εξόδου με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερες ψήκτρες για την απαγωγή της θερμότητας. Απότομες αλλαγές της

θερμοκρασίας αλλοιώνουν τις παραμέτρους των τρανζίστορ και προκαλούν αλλοίωση στο σήμα εξόδου. Επιπλέον, η ισχύς θα πρέπει να λάβει υπόψη ότι το ανθρώπινο αυτί δεν αντιλαμβάνεται την ακουστική ισχύ αλλά την πίεση. Γι αυτό το λόγο θα πρέπει να τετραπλασιαστεί η ισχύς για να διπλασιαστεί η ηχοστάθμη SPL (Sound Pressure Level):

$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) dB, P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

Όσον αφορά την απόκριση της συχνότητας, θα πρέπει να υπάρχει διακύμανση από 20Hz έως 20kHz. Μεγαλύτερο εύρος είναι επιθυμητό καθώς πολλά μουσικά κομμάτια περιέχουν απότομες διακυμάνσεις σε υψηλότερες από αυτές συχνότητες που αν αποκοπούν θα προκληθούν παραμορφώσεις αντιληπτές από τον ακροατή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο θόρυβος που παρουσιάζει ένας ενισχυτής ήχου. Το επίπεδο θορύβου μετριέται από τον λόγο του σήματος προς το θόρυβο:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_{signal}}{V_{noise}}.$$

Η παραμόρφωση πρέπει να είναι όσο τον δυνατόν μικρότερη. Το μέτρο της είναι THD (Total Harmonic Distortion):

$$\%THD = 100 \cdot \frac{\sum U_{RMS(i)}^2}{U_{RMS(f_0)}^2}, \text{ όπου } U_{RMS(i)} \text{ είναι η RMS τιμή της } i \text{ αρμονικής και η } U_{RMS(f_0)} \text{ η RMS τιμή της θεμελιώδους αρμονικής.}$$

Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να περάσει το μεγαλύτερο μέρος της τάσης της πηγής στον ενισχυτή και παράλληλα να μην απαιτηθεί από την πηγή υψηλή τιμή ρεύματος. Από την άλλη η αντίσταση εξόδου θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή (ιδανικά μηδενική), έτσι ώστε ο ενισχυτής να αποτελεί μια ιδανική πηγή τάσης που δεν επηρεάζεται από το φορτίο που οδηγεί. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό μιας και η εμπίδηση των ηχείων εξαρτάται από την συχνότητα του σήματος εξόδου. Έτσι αν και μια μηδενική εμπίδηση είναι αδύνατη, μπορούμε να καταφέρουμε μία προσέγγιση της με την χρήση μεγάλης αρνητικής ανάδρασης. Τέλος ο συντελεστής απόσβεσης είναι το κλάσμα της εμπίδησης του φορτίου προς την εμπίδηση εξόδου.

$$Damping\ factor = \frac{R_{load}}{R_{out}}$$

## 2.4 Ενισχυτές ac-coupled και dc-coupled

Όλοι οι ενισχυτές ισχύος είναι είτε ac-coupled είτε dc-coupled. Στο πρώτο είδος υπάρχει μία τροφοδοσία με την έξοδο πολωμένη στο μισό ανάμεσα στην τροφοδοσία και τη γη, ώστε να δίνει το μέγιστο δυνατό συμμετρικό πλάτος τάσης, γι αυτό χρησιμοποιείται ένας μεγάλος πυκνωτής σε σειρά με την έξοδο για να αποβάλλει την dc συνιστώσα. Το δεύτερο είδος έχει και αρνητική και θετική τροφοδοσία και η έξοδος είναι πολωμένη στα 0 volt, άρα δεν απαιτείται αποβολή της dc συνιστώσας.

Τα πλεονεκτήματα του ac-coupled ενισχυτή είναι τα εξής:

1. Το offset της εξόδου είναι πάντα μηδέν εκτός και αν παρουσιάζει διαρροή ο πυκνωτής
2. Είναι πολύ απλό να εμποδίσει μεταβατικά φαινόμενα να συμβούν μέσω καθαρά ηλεκτρονικών μέσων. Η έξοδος του ενισχυτή πρέπει να φτάσει μέχρι το μισό της τροφοδοσίας κατά το άνοιγμα και δεδομένου ότι αυτό γίνεται αρκετά αργά, δεν υπάρχει ηχητικά αντιληπτό μεταβατικό φαινόμενο.
3. Δεν απαιτείται προστασία απέναντι στα dc σφάλματα, δεδομένου ότι ο πυκνωτής εξόδου είναι επιλεγμένος να αντέχει στην τάση τροφοδοσίας, ενώ στους dc-coupled απαιτείται ένα ακριβό και πιθανώς μη αξιόπιστο ρελέ εξόδου για την προστασία των ηχείων

Τα πλεονεκτήματα του dc-coupled ενισχυτή είναι:

1. Δεν απαιτείται μεγάλος και ακριβός πυκνωτής εξόδου. Από την άλλη πλευρά η διπλή τροφοδοσία θα χρειαστεί έναν επιπλέον πυκνωτή όμοια ακριβό και μερικά ακόμα στοιχεία
2. Κανονικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει μεταβατικό φαινόμενο στην έξοδο κατά το άνοιγμα, εφόσον η συμμετρική τάση τροφοδοσίας δεν δημιουργεί την ανάγκη μετάβασης της εξόδου σε μία συγκεκριμένη τάση πόλωσης. Όμως πρακτικά διάφοροι πυκνωτές που χρησιμοποιούνται, για να διατηρήσουν τις τάσεις πόλωσης σταθερές και χωρίς κύμανση, είναι πιθανόν να κάνουν τάσεις σε διάφορα τμήματα του ενισχυτή να πάρουν την τελική τους τιμή σε διαφορετικό χρόνο και η μεταβατική απόκριση της εξόδου να γίνει αρκετά σημαντική. Αυτό μπορεί πολύ εύκολα να αντιμετωπιστεί με ένα ρελέ προστασίας, το οποίο θα συνδέει τον ενισχυτή με το φορτίο μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι να παύσουν τα μεταβατικά φαινόμενα.
3. Παραμόρφωση που μπορεί να υπάρχει από τον πυκνωτή εξόδου αποφεύγεται. Έχει αποδειχθεί ότι απαιτείται πολύ μεγάλος πυκνωτής εξόδου (της τάξης 100000μF), ώστε να μην υπάρχει πρόσθετη παραμόρφωση. Σε κάθε άλλη περίπτωση, υπάρχει παραμόρφωση κυρίως στις χαμηλές συχνότητες, αλλά και πιθανόν και στις μεσαίες.
4. Τα ρεύματα τροφοδοσίας είναι συμμετρικά, οπότε μικρό ποσοστό αυτών περνά στη γείωση. Έτσι αποφεύγεται σημαντική παραμόρφωση και φαινόμενα παρεμβολών.

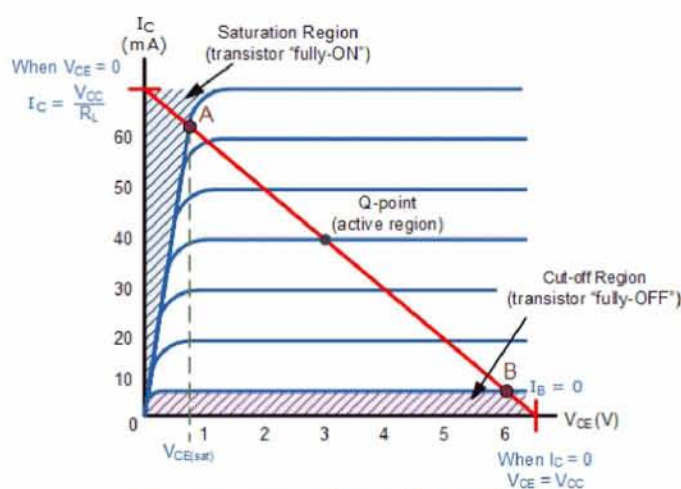


### 3. Ενισχυτής Τάξης Α

#### 3.1 Εισαγωγή

Στον ενισχυτή τάξης Α υπάρχει μια γενικότερη απλότητα στην κατασκευή του που τον ξεχωρίζει από τους υπόλοιπους ενισχυτές αφού παρουσιάζει σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις. Η γραμμικότητα του οφείλεται στο γεγονός ότι τα τρανζίστορ του άγουν συνεχώς και είναι πολωμένα στο πιο γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής του καμπύλης. Όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 3-1, στο οποίο απεικονίζεται το ρεύμα συλλέκτη ενός τρανζίστορ συναρτήσει της τάσης συλλέκτη εκπομπού, το τρανζίστορ πολώνεται στη μέση της γραμμικής περιοχής λειτουργίας του.

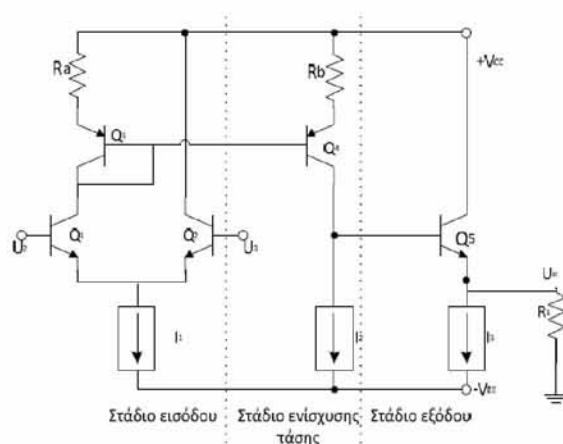
Το μόνο μειονέκτημα του ενισχυτή αυτού είναι ότι δεν είναι αρκετά αποδοτικός. Έτσι απορρίπτεται συνήθως από εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μεγάλη ισχύς ή χαμηλή κατανάλωση.



3-1 Χαρακτηριστική καμπύλη τρανζίστορ

#### 3.2 Στάδια Ενισχυτή

Οι ενισχυτές ήχου στην πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική τριών σταδίων η οποία φαίνεται στο σχήμα 3-2



3.2 Αρχιτεκτονική τριών σταδίων

Στην αρχιτεκτονική αυτή το πρώτο στάδιο είναι ένα στάδιο εισόδου/διαγωγιμότητας (παίρνει τάση και βγάζει ρεύμα), το δεύτερο είναι ένα στάδιο διαντίστασης (παίρνει ρεύμα και βγάζει τάση) και το τρίτο είναι ένα στάδιο εξόδου το οποίο και θα οδηγήσει το φορτίο. Σκοπός του δεύτερου σταδίου είναι να καθορίσει την στάθμη της τάσης εξόδου του σήματος και γι αυτό το λόγο καλείται στάδιο ενίσχυσης τάσης. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει αρκετά πλεονεκτήματα και γι αυτό χρησιμοποιείται από τους περισσότερους ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων. Το κυριότερο από αυτά είναι το γεγονός ότι είναι αρκετά εύκολο να ρυθμιστούν οι διάφοροι παράμετροι και να λειτουργούν τα τρία στάδια με σχεδόν μηδενική αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

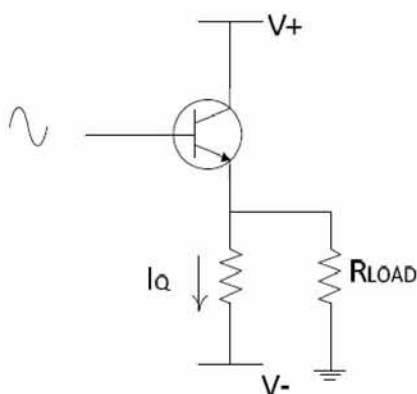
Συνήθως στα τρανζίστορ εμφανίζονται μη-γραμμικότητες οι οποίες οφείλονται κυρίως στην μετάβαση τους από την περιοχή αποκοπής στην ενεργό περιοχή. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στον ενισχυτή τάξης Α μιας και εδώ το ρεύμα ρέει συνεχώς προς τα τρανζίστορ εξόδου. Στους ενισχυτές αυτού του είδους χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές βαθμίδες εξόδου που αν και δεν αναφέρονται συνήθως, λειτουργούν εντελώς διαφορετικά.

Στην πρώτη κατηγορία το στάδιο εξόδου αποτελείται από έναν ενισχυτή τάξης Β (δηλαδή δύο κοινού συλλέκτη τρανζίστορ τα οποία δουλεύουν back to back), που με αυξανόμενη θετική πόλωση το ρεύμα ρέει επαρκώς έτσι ώστε κανένα από τα τρανζίστορ να μην είναι στην αποκοπή, κάτω από φυσιολογικό φορτίο. Στην αρχιτεκτονική αυτή δεν ξεμένει ποτέ η έξοδος από ρεύμα. Μάλιστα στην περίπτωση που η εμπέδηση του φορτίου το οποίο οδηγείται γίνει αρκετά μικρή τότε το στάδιο τάξης Β γίνεται αυτόματα στάδιο τάξης ΑΒ, ελπίζοντας με αυτόν τον τρόπο ότι θα εμφανίσει την μικρότερη δυνατή παραμόρφωση.

Στην άλλη κατηγορία έχουμε έναν ακόλουθο εκπομπού που προσφέρει επαρκές ρεύμα. Αν κάποια στιγμή ξεμείνει από την δυνατότητα να παρέχει ρεύμα τότε οδηγεί την έξοδο σε ψαλιδισμό σαν να μην έχει την δυνατότητα να φτάσει στην απαιτούμενη τάση εξόδου. Αυτό το στάδιο βέβαια απαιτεί μια σαφή ιδέα για το πόσο χαμηλά είναι δυνατόν να φτάσει η εμπέδηση του φορτίου εξόδου το οποίο και οδηγεί. Παρακάτω θα αναφερθούμε σε τρία πιθανά στάδια εξόδου.

### 3.3 Στάδια Εξόδου

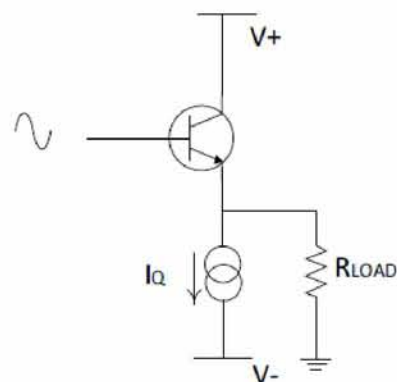
Η πιο απλή δομή σταδίου εξόδου είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3-3 στο



οποίο υπάρχει μόνο ένα τρανζίστορ και φορτίο αντίσταση. Όσο το ρεύμα εξόδου αυξάνεται, υπάρχει μια αναπόφευκτη πτώση τάσης στην αντίσταση του εκπομπού περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αρνητική τάση που μπορεί να εμφανιστεί στην έξοδο. Η απόδοση της αρχιτεκτονικής αυτής είναι αρκετά μικρή και δεν υπερβαίνει το 12.5%, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό για πρακτικές εφαρμογές.

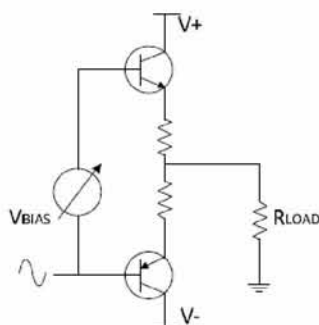
3.3-3 Στάδιο εξόδου με αντίσταση εκπομπού

Μία άλλη τοπολογία είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3-4. Σε αυτήν αντί για αντίσταση στον εκπομπό τοποθετούμε μία πηγή συνεχούς ρεύματος. Το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτή τη πηγή δεν εξαρτάται από την τάση στα άκρα της και έτσι η τάση εξόδου μπορεί να προσεγγίζει την αρνητική τάση τροφοδοσίας. Η μέγιστη απόδοσης που μπορεί να φτάσει αυτή η τοπολογία είναι το 25% για μέγιστη έξοδο.



3.3-4 Στάδιο εξόδου με πηγή συνεχούς ρεύματος

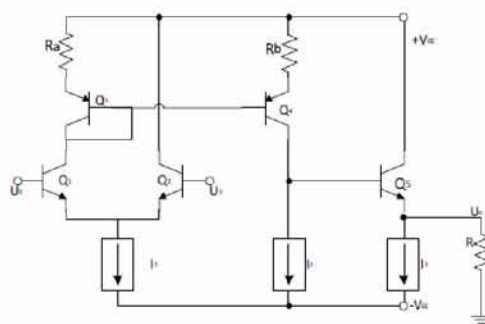
Μία άλλη τοπολογία είναι αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 3-5. Αποτελεί μια συμπληρωματική τοπολογία των προηγούμενων (push pull) και παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα. Λειτουργεί σε καθαρό στάδιο τάξης A αν η τάση πόλωσης και το ρεύμα ηρεμίας αυξηθούν αρκετά και μεταβαίνει αυτόματα σε στάδιο AB στην περίπτωση που η εμπέδηση του φορτίου εξόδου αυξηθεί αρκετά, έτσι ώστε να μην υπάρξει ψαλιδισμός της τάσης εξόδου.



3.3-5 Στάδιο εξόδου push pull

### 3.4 Θεωρητική Ανάλυση

Θα χρησιμοποιήσουμε το απλοποιημένο μοντέλο ενισχυτή τριών σταδίων που δώσαμε και πριν (και το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 3-6) για να υπολογίσουμε τις βασικές παραμέτρους του ενισχυτή. Σε αυτό θεωρούμε ότι οι πηγές ρεύματος που χρησιμοποιούμε είναι ιδανικές και έχουν άπειρη αντίσταση εισόδου.



3.4-6 Απλοποιημένο μοντέλο ενισχυτή τριών σταδίων

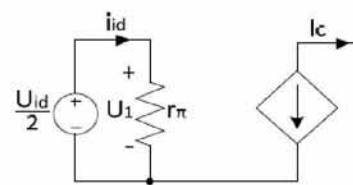


### 3.4.1. Αντίσταση εισόδου

Για τον υπολογισμό της αντίστασης εισόδου χρησιμοποιούμε το σχήμα 3-7 το οποίο αποτελεί μία ac ανάλυση. Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι ίση με την αντίσταση εισόδου του διαφορικού ζεύγους η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$R_{ID} = \frac{V_{id}}{I_{id}} = 2 \cdot r_{\pi 2}$$

$$R_{ID} = 2 \cdot r_{\pi 2} = 2 \cdot r_{\pi 1}$$



3.4-7 Μοντέλο μικρού σήματος

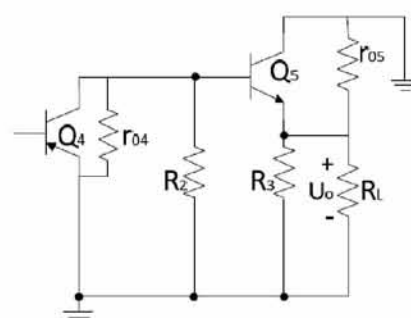
### 3.4.2. Υπολογισμός Κέρδους Τάσης Ανοικτού Βρόχου

Με βάση το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που δίνουμε στο σχήμα 3-8, η ολική απολαβή του ενισχυτή μπορεί να εκφραστεί:  $A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$

Το πρώτο στάδιο το οποίο είναι και το στάδιο διαγωγιμότητας (δέχεται ως είσοδο τάση και βγάζει ρεύμα), έχει κέρδος το λόγο ρεύματος προς τάση:

$$A_1 = -\frac{g_{m1}}{2}$$

Στο δεύτερο στάδιο, μέσω του καθρέπτη ρεύματος, που υλοποιείται από τα  $Q_3$  και  $Q_4$ , το ρεύμα του συλλέκτη του  $Q_1$  καθρεπτίζεται στο ρεύμα συλλέκτη του  $Q_4$ . Ο λόγος των ρευμάτων μπορεί να καθοριστεί από τις αντιστάσεις  $R_a$  και  $R_b$ . Η τάση στην έξοδο του δεύτερου σταδίου καθορίζεται από την αντίσταση που βλέπει στο συλλέκτη του  $Q_4$ . Το κέρδος του δεύτερου σταδίου είναι:



3.4.2-8 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα για υπολογισμό αντίστασης συλλέκτη δεύτερης βαθμίδας

$$A_2 = a \cdot (R_2 \parallel (r_{o4} + R_b)) \parallel (r_{\pi 5} + (\beta + 1)(R_3 \parallel R_L \parallel r_{o5}))$$

$$= a(r_{o4} \parallel (r_{\pi 5} + (\beta + 1)R_L))$$

Όπου οι αντιστάσεις  $R_2$  και  $R_3$  θεωρούνται άπειρες και  $a$  είναι ο λόγος των ρευμάτων του καθρέπτη ρεύματος που υλοποιείται από τα  $Q_3$  και  $Q_4$ .

Το κέρδος του τρίτου σταδίου είναι περίπου:  $A_3 = \frac{(\beta_{o5} + 1)R_L}{r_{\pi 5} + (\beta_{o5} + 1)R_L} \approx 1$ .

Συνολικά λοιπόν το κέρδος του ενισχυτή είναι:

$$A = -\frac{g_{m1}}{2} \cdot a(r_{o4} \parallel (r_{\pi 5} + (\beta + 1)R_L))$$

### 3.4.3. Αντίσταση Εξόδου

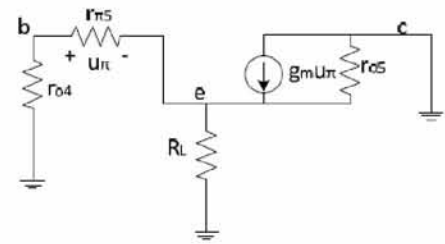
Για να υπολογίσουμε την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή θα χρησιμοποιήσουμε το ac μοντέλο του σταδίου εξόδου το οποίο και δίνεται στο σχήμα 3-9. Έστω ότι υπάρχει μια τάση  $U_{test}$  στον εκπομπό του  $Q_5$ , το ρεύμα που θα περάσει  $I_{test}$  θα είναι:

$$I_{test} = -g_m U_\pi + \frac{U_{test}}{(r_{\pi 5} + r_{o4}) \parallel r_{o5}} \rightarrow$$

$$I_{test} = g_m U_{test} \frac{r_{\pi 5}}{(r_{\pi 5} + r_{o4})} + \frac{U_{test}}{(r_{\pi 5} + r_{o4}) \parallel r_{o5}} \rightarrow$$

$$\frac{U_{test}}{I_{test}} = \frac{1}{\frac{\beta}{r_{\pi 5} + r_{o4}} + \frac{1}{(r_{\pi 5} + r_{o4}) \parallel r_{o5}}}$$

Η Rout πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.



3.4.3-9 Απλοποιημένο ac μοντέλο του σταδίου εξόδου

### 3.4.4. CMRR

CMRR (Common mode rejection ratio) είναι ο λόγος του κέρδους για διαφορική είσοδο προς το κέρδος για κοινή είσοδο μετρούμενο σε dB. Πραγματοποιώντας ac ανάλυση στο κύκλωμα του σχήματος 3-10 έχουμε τους παρακάτω υπολογισμούς:

$$I_{c1} = g_{m1} U_\pi$$

$$U_{ic} = U_\pi + U_e$$

$$U_e = \left( g_{m1} U_\pi + \frac{U_\pi}{r_{\pi 1}} \right) 2R_1$$

$$U_{ic} = U_\pi \left( 1 + g_{m1} 2R_1 + \frac{2R_1}{r_{\pi 1}} \right) \rightarrow U_\pi = \frac{U_{ic}}{1 + g_{m1} 2R_1 + \frac{2R_1}{r_{\pi 1}}}$$

$$I_{c1} = g_{m1} \frac{U_{ic}}{1 + g_{m1} 2R_1 + \frac{2R_1}{r_{\pi 1}}} = g_{m1} \frac{U_{ic}}{1 + 2R_1 g_{m1} \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \approx g_{m1} \frac{U_{ic}}{1 + 2R_1 g_{m1}}$$

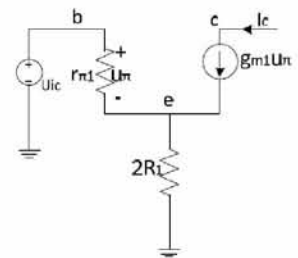
$$CMRR = \frac{\frac{g_{m1}}{2}}{\frac{g_{m1}}{1 + 2R_1 g_{m1}}} = \frac{1 + 2R_1 g_{m1}}{2}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το CMRR τόσο το καλύτερο, γιατί σημαίνει ότι ο διαφορικός ενισχυτής ενισχύει το επιθυμητό σήμα και απορρίπτει το κοινό σήμα, που είναι ανεπιθύμητο. Για να συμβεί όμως αυτό χρειάζεται μεγάλη αντίσταση εξόδου πηγής ρεύματος.

### 3.4.5. DC ανάλυση

Η dc ανάλυση γίνεται μόνο και μόνο για να καθοριστούν οι τάσεις και τα ρεύματα πόλωσης. Όπως φάνηκε και από τους παραπάνω υπολογισμούς, το σημείο λειτουργίας των τρανζίστορ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων του ενισχυτή.

Εφόσον το στάδιο εξόδου συνδέεται απευθείας στο φορτίο, χωρίς την χρήση πυκνωτή σύζευξης, θα πρέπει η τάση στην έξοδο να είναι μηδενική για μηδενική



3.4.4-10 Απλοποιημένο ac ισοδύναμο για την εύρεση κέρδους κοινού τρόπου



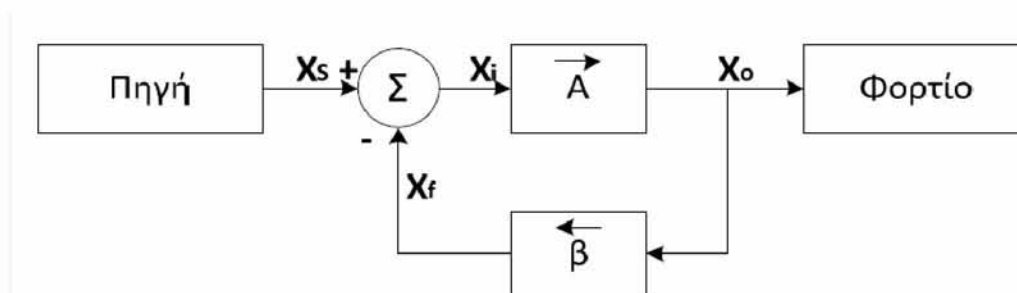
είσοδο. Σύμφωνα λοιπόν με το κύκλωμα του σχήματος 3-6 το ρεύμα πόλωσης του τρανζίστορ  $Q_1$  είναι ίδιο με εκείνο του συλλέκτη του τρανζίστορ  $Q_4$ . Για να έχουμε τώρα  $V_o = 0$  θα πρέπει  $I_{EQ5} = I_3$ . Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα βάσης του  $Q_5$ . Εφόσον πλέον γνωρίζουμε τα ρεύματα της βάσης του  $Q_5$  και του συλλέκτη του  $Q_4$  μπορούμε να προσδιορίσουμε το ρεύμα της πηγής ρεύματος  $I_2$ .

### 3.4.6. Ανάδραση

Στους ενισχυτές χρησιμοποιείται αρνητική ανάδραση για να επιτύχουμε τα παρακάτω:

1. Απευαισθητοποίηση του κέρδους. Η τιμή του κέρδους γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στις μεταβολές των τιμών των κυκλωματικών στοιχείων
2. Μείωση της μη γραμμικής παραμόρφωσης. Η έξοδος γίνεται ανάλογη της εισόδου, το κέρδος γίνεται σταθερό και ανεξάρτητο από το επίπεδο του σήματος.
3. Μείωση του θορύβου. Έτσι ελαχιστοποιείται η συνεισφορά στην έξοδο μη επιθυμητών ηλεκτρικών σημάτων, που μπορεί να προέρχονται από τα στοιχεία του κυκλώματος ή και από εξωτερικές παρεμβολές.
4. Έλεγχος των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου. Μπορούμε να αυξήσουμε ή να μειώσουμε τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου με επιλογή κατάλληλης τοπολογίας ανάδρασης.
5. Αύξηση του εύρους ζώνης του ενισχυτή.

Στο σχήμα 3-11 φαίνεται η βασική δομή ενός ενισχυτή με ανάδραση. Το κάθε  $x$  μπορεί να αντιπροσωπεύει είτε ένα σήμα τάσης είτε ένα σήμα ρεύματος.



3.4.6-11 Ενισχυτής με ανάδραση

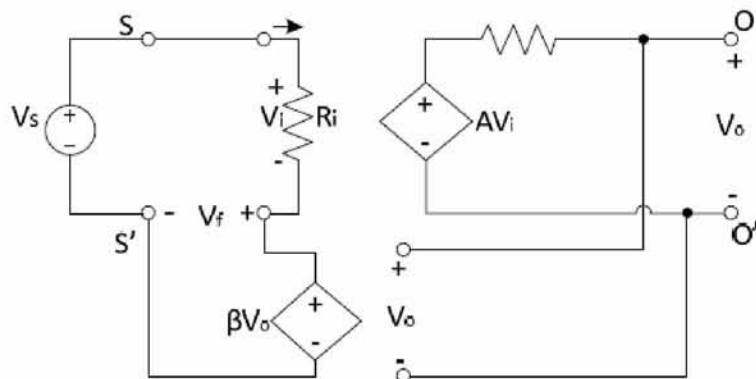
Ο ενισχυτής ανοιχτού βρόχου έχει κέρδος  $A$  και γι' αυτό ισχύει ότι:  $x_o = Ax_i$ . Δηλαδή η έξοδος  $x_o$  του ενισχυτή, τροφοδοτεί όχι μόνο το φορτίο αλλά και το δίκτυο ανάδρασης το οποίο παρέχει ένα δείγμα του σήματος εξόδου. Αυτό το δείγμα  $x_f$  σχετίζεται με το σήμα  $x_o$  μέσω της σχέσης  $x_f = \beta x_o$ , όπου  $\beta$  είναι ένας συντελεστής ανάδρασης.

Το σήμα αυτό  $x_f$  το οποίο και δημιουργείται αφαιρείται από το σήμα της πηγής  $x_s$  (που αποτελεί το σήμα εισόδου του πλήρη ενισχυτή με ανάδραση) και έτσι δημιουργείται ένα σήμα  $x_i$  το οποίο και αποτελεί το σήμα εισόδου του βασικού ενισχυτή:  $x_i = x_s - x_f$

Ουσιαστικά αυτό που κάνει η ανάδραση είναι να μειώνει το σήμα εισόδου του βασικού ενισχυτή. Το κέρδος του ενισχυτή με ανάδραση είναι:  $A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1+A\beta}$

Η ποσότητα  $A\beta$  αποτελεί το κέρδος βρόχου. Για αρνητική ανάδραση θα πρέπει αυτή η ποσότητα να είναι θετική, δηλαδή το σήμα  $x_f$  να έχει ίδιο πρόσημο με το σήμα

$x_s$  και έτσι το σήμα  $x_i$  που προκύπτει μετά την αφαίρεση να είναι μικρότερο σε τιμή από το αρχικό. Για θετικό  $A\beta$  το κέρδος του ενισχυτή με ανάδραση είναι μικρότερο του κέρδους ανοικτού βρόχου  $A$  κατά την ποσότητα  $1+A\beta$ , η οποία και καλείται ποσό ανάδρασης. Στο σχήμα 3-12 δίνεται το ισοδύναμο μοντέλο του ενισχυτή με ανάδραση σειρά-παράλληλα.



3.4.6-12 Ισοδύναμο μοντέλο του ενισχυτή με ανάδραση σειρά-παράλληλα

Οι αντιστάσεις  $R_{if}$  και  $R_{of}$  αντιπροσωπεύουν τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου όταν υπάρχει η ανάδραση. Παρατηρώντας το σχήμα προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{V_s}{\frac{V_i}{R_i}} = R_i \frac{V_i + \beta AV_i}{V_i} = R_i(1 + A\beta)$$

Στην περίπτωση που έχουμε αρνητική ανάδραση η αντίσταση εισόδου αυξάνεται κατά ένα παράγοντα ίσο με το ποσό ανάδρασης  $1+A\beta$ . Για την εύρεση της αντίστασης εξόδου  $R_{of}$  θέτουμε την τάση  $V_s$  στο μηδέν και εφαρμόζουμε μία τάση ελέγχου  $V_t$ , στη έξοδο.

$$R_{of} = \frac{V_t}{I}$$

Από το σχήμα έχουμε ότι:  $I = \frac{V_t - AV_i}{R_o}$  και αφού  $V_s=0$  ισχύει ότι:  $V_i = -V_f = -\beta V_o = -\beta V_t$

$$\text{Άρα } I = \frac{V_t + A\beta V_t}{R_o} \text{ και κατ' επέκταση } R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

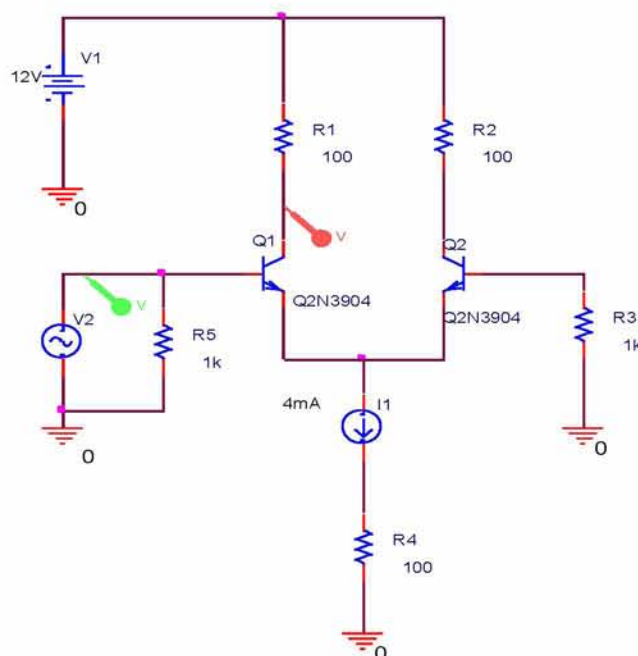
Στην περίπτωση που έχουμε αρνητική ανάδραση η αντίσταση εξόδου μειώνεται κατά ένα παράγοντα ίσο με το ποσό ανάδρασης  $1+A\beta$ .

## 3.5 Ανάλυση Κυκλώματος

### 3.5.1. Περιγραφή κυκλώματος

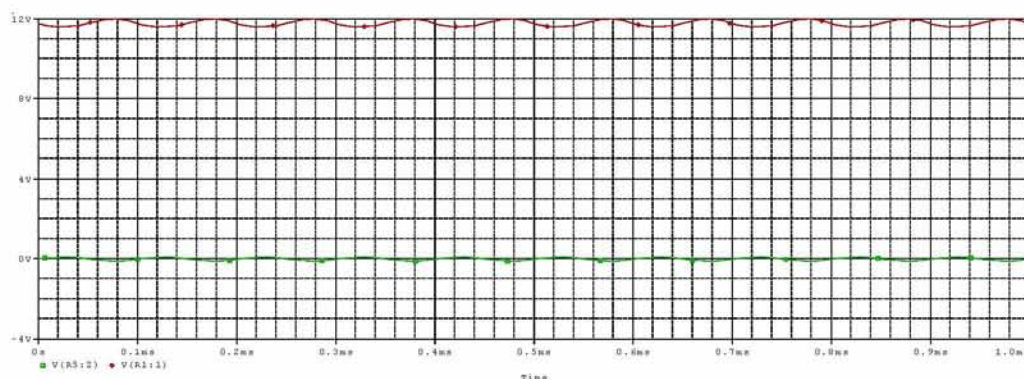
Ο ενισχυτής αποτελείται από τέσσερα τμήματα με διαφορετικό ρόλο το καθένα. Το καθένα από αυτά θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω. Η προσομοίωση τους έγινε με την χρήση του προγράμματος Orcad 10.3.

**Διαφορικός ενισχυτής:** Παρακάτω δίνεται το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για την προενίσχυση του σήματος εισόδου. Ο διαφορικός ενισχυτής αποτελείται από το ζεύγος των τρανζίστορ Q1 και Q2. Το κάθε ένα τμήμα του διαφορικού ζεύγους πολώνεται στο μισό ρεύμα της πηγής ρεύματος που έχουμε τοποθετήσει.



3-13 Διαφορικό ζεύγος

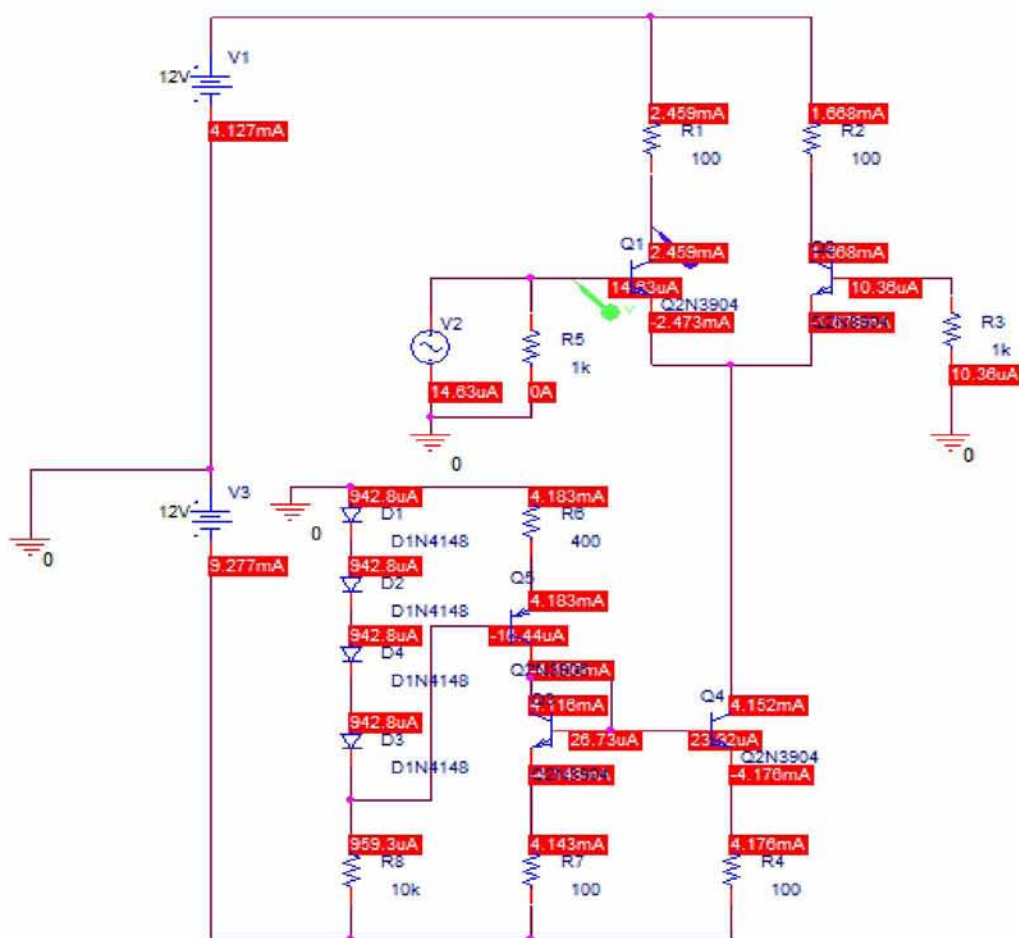
Στον παραπάνω διαφορικό ενισχυτή θα γίνεται η ενίσχυση του σήματος εισόδου. Προς το παρόν έχουμε ορίσει σταθερό ρεύμα τροφοδοσίας και στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε ανάλογο κύκλωμα που θα εξασφαλίζει την συνεχή τροφοδοσία του κυκλώματος με το ζητούμενο ρεύμα. Έχουμε επιλέξει ως είσοδο ένα σήμα πλάτους 100mV και συχνότητας 100kHz που ανταποκρίνεται στην έξοδο ενός mp3 player. Η απόδοση του διαφορικού ενισχυτή ( $V_{out}/V_{in}$ ) εξαρτάται είτε από την πηγή ρεύματος είτε από τις δύο αντιστάσεις R1 και R2. Προσπαθούμε να κάνουμε την κατάλληλη επιλογή τιμών και στα δύο έτσι ώστε να μην αλλοιώνεται το ημιτονικό σήμα εισόδου. Το μόνο που επιθυμούμε είναι η αύξηση του πλάτους του. Παρακάτω δίνουμε ένα γράφημα στο οποίο απεικονίζεται η είσοδος σε συνάρτηση με την έξοδο.



3-14 Είσοδος και έξοδος διαφορικού ζεύγους



**Πηγή σταθερού ρεύματος:** Παρακάτω δίνεται το κύκλωμα της πηγής τροφοδοσίας του κυκλώματος.

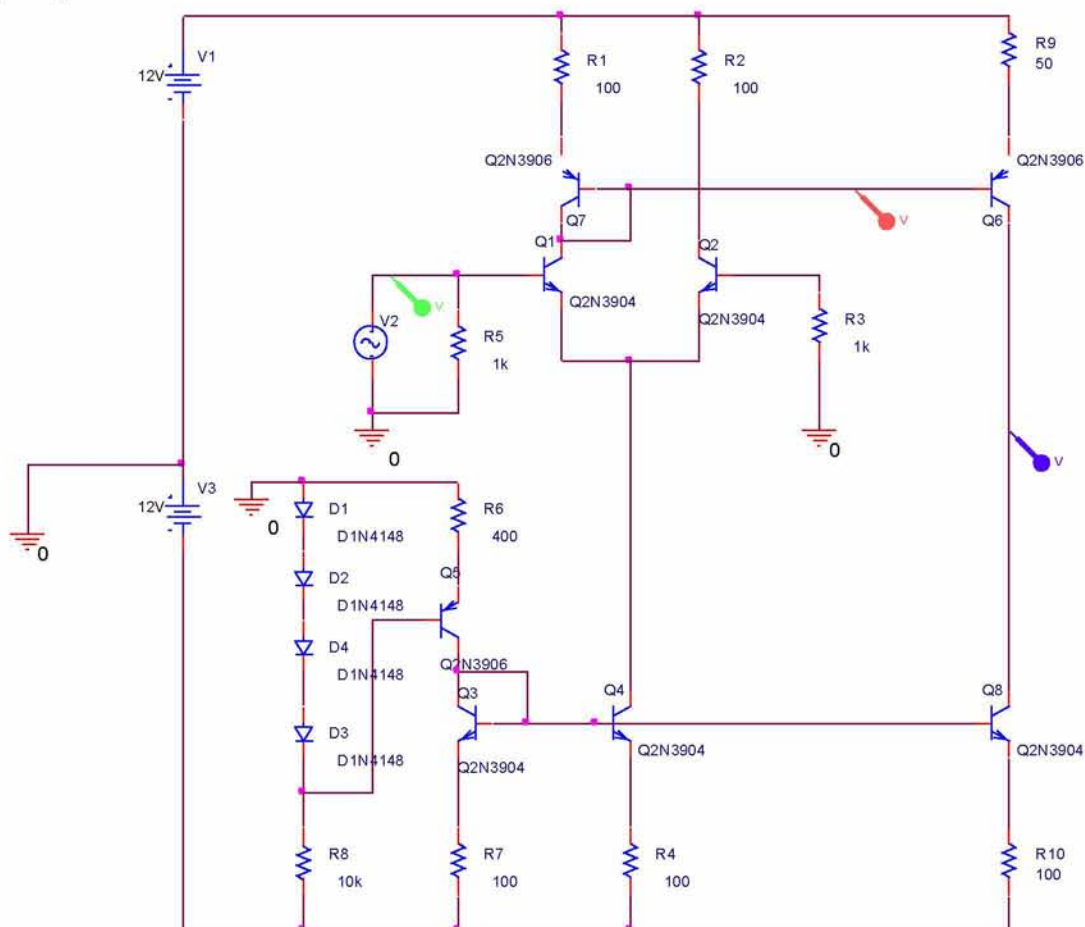


### 3-15 Διαφορικό ζεύγος με πηγή σταθερού ρεύματος

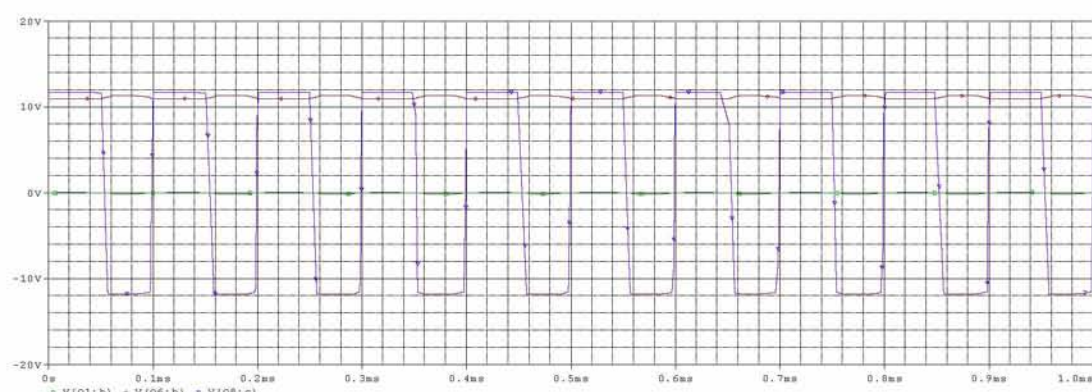
Το κύκλωμα που αποτελείται από το τρανζίστορ Q5 μαζί με τις τέσσερις διόδους και την αντίσταση R6 υλοποιούν μία πηγή σταθερού ρεύματος. Η τιμή του ρεύματος που δημιουργείται στον συλλέκτη του Q5 εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης R6. Τα τρανζίστορ Q3 και Q4 από την άλλη αποτελούν έναν καθρέπτη ρεύματος που σκοπό έχουν να απεικονίσουν το ρεύμα που δημιουργείται στο αριστερό κομμάτι στην βάση του διαφορικού ζεύγους. Έτσι το ρεύμα του συλλέκτη του Q4 αποτελεί το ρεύμα του διαφορικού ζεύγους.

**Ενισχυτής τάσης:** Ο ενισχυτής τάσης αποτελείται από τα τρανζίστορ Q6 και Q8 και παρέχει ένα μεγάλο κέρδος τάσης μεταξύ σταδίου προενίσχυσης (διαφορικός ενισχυτής) και σταδίου εξόδου. Το τρανζίστορ Q3 μαζί με το Q8 αποτελούν και πάλι έναν καθρέπτη ρεύματος που καθρεπτίζουν το ρεύμα της σταθερής πηγής ρεύματος. Το Q6 αποτελεί μία class A βαθμίδα ενίσχυσης τάσης και το ρεύμα στον συλλέκτη του τρανζίστορ Q8 αποτελεί το ρεύμα πόλωσης της βαθμίδας αυτής. Η αντίσταση R9 επηρεάζει την απόδοση της συγκεκριμένης βαθμίδας. Τέλος τα τρανζίστορ Q6 και Q7 αποτελούν καθρέπτη ρεύματος και καθρεφτίζουν το ρεύμα που υπάρχει στο συλλέκτη

του Q1(το οποίο και αποτελεί το σήμα το οποίο θέλουμε να ενισχύσουμε). Παρακάτω δίνεται το κύκλωμα καθώς και το γράφημα του σήματος εισόδου σε συνάρτηση με το σήμα εξόδου.



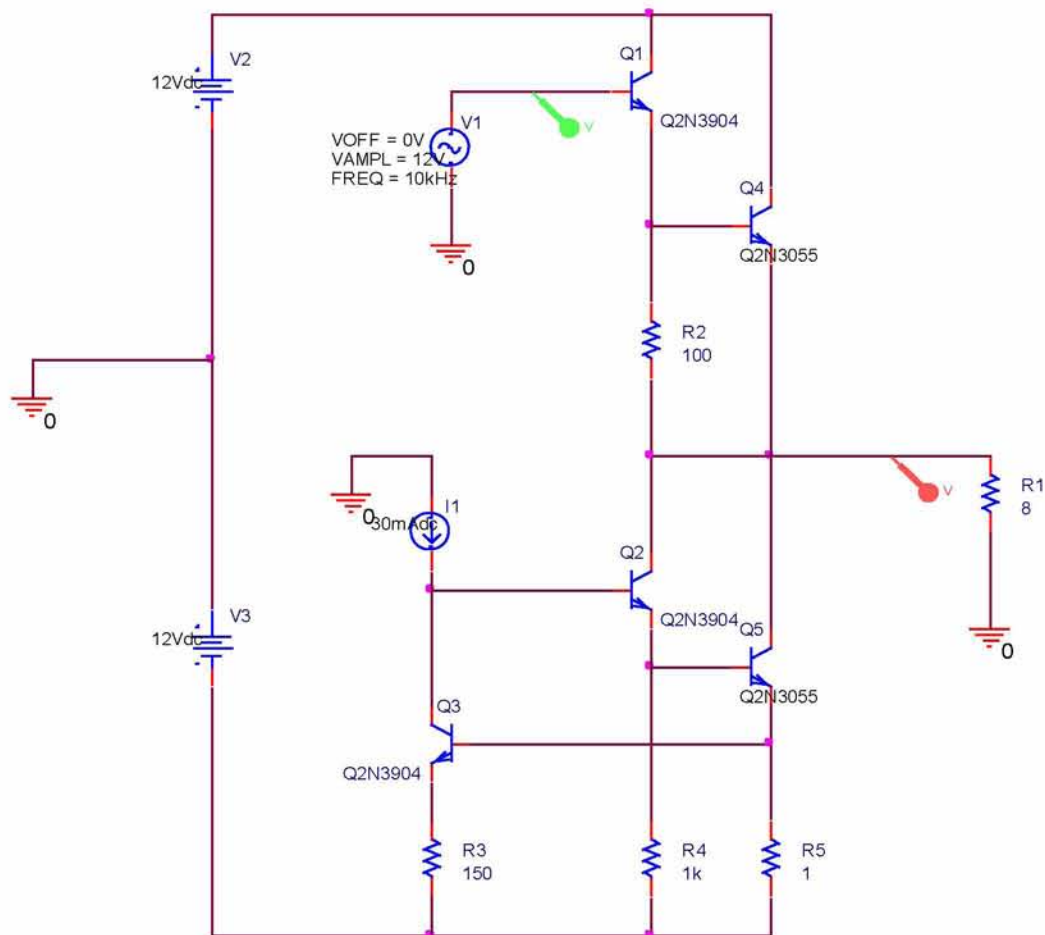
3-16 Διαφορικό ζεύγος μαζί με τον ενισχυτή τάσης



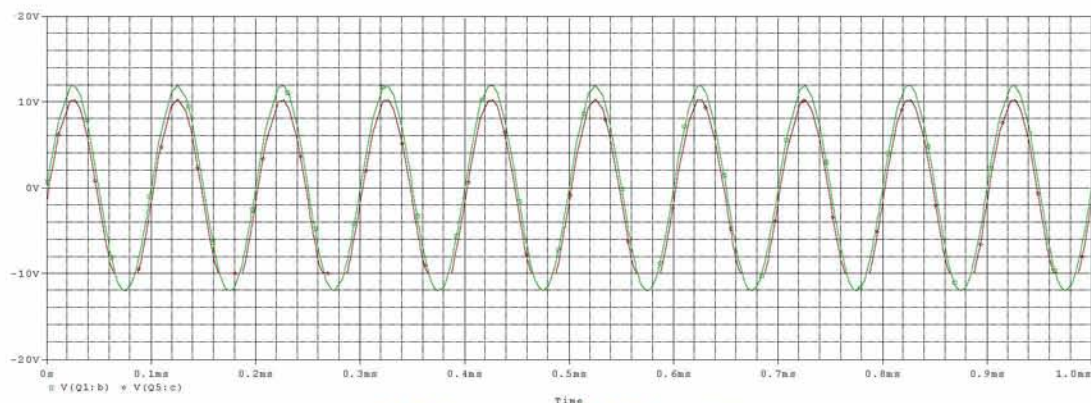
3-17 Είσοδος και έξοδος του ενισχυτή τάσης

**Βαθμίδα εξόδου:** Παρακάτω δίνουμε το στάδιο εξόδου του ενισχυτή μας. Πρόκειται για Push-Pull συνδεσμολογία στην οποία τα τρανζίστορ Q1 και Q4 υλοποιούν μία NPN darlington συνδεσμολογία και τα Q2 και Q5 επίσης μια NPN darlington συνδεσμολογία. Το Q3 μαζί με τα Q2 και Q5 λειτουργούν ως μία πηγή

σταθερού ρεύματος και παράγουν το επιθυμητό ρεύμα για το στάδιο εξόδου. Η πηγή σταθερού ρεύματος που έχουμε τοποθετήσει θα αντικατασταθεί από αντίστοιχο κύκλωμα, όπως και πριν. Παρακάτω δίνουμε το κύκλωμα καθώς και την γραφική παράσταση των σημάτων εισόδου και εξόδου.



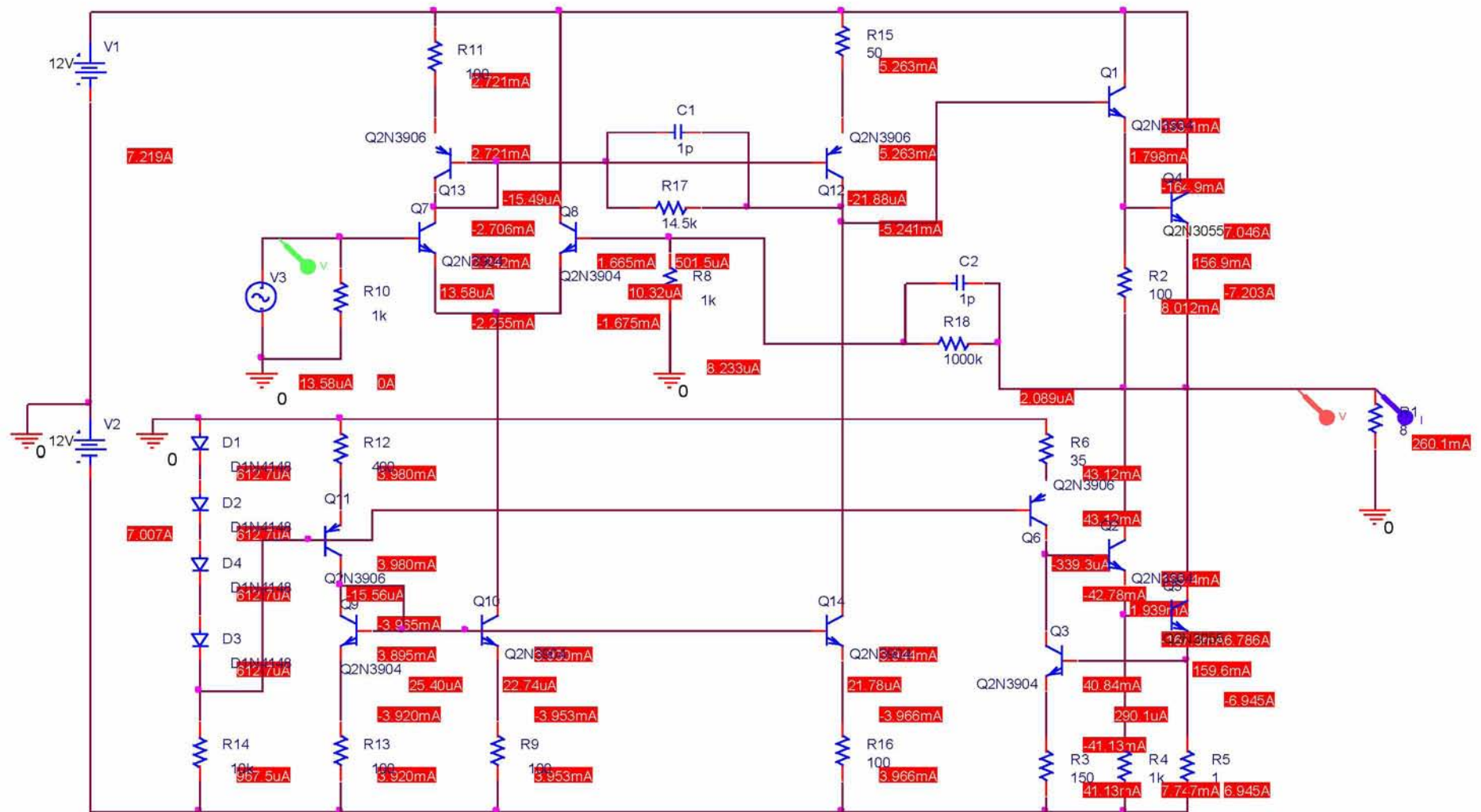
3-18 Βαθμίδα εξόδου



3-19 Κυματομορφή βαθμίδας εξόδου

Παρακάτω ακολουθεί η ένωση όλων των προηγούμενων βαθμίδων στο τελικό κύκλωμα.

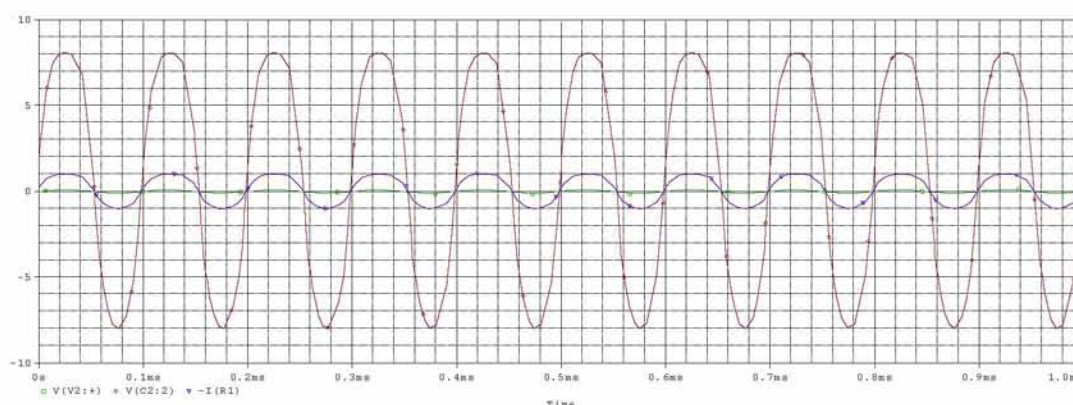




3-20 Σχέδιο ενισχυτή τάξης Α

Στο παραπάνω κύκλωμα το τρανζίστορ Q6 αποτελεί μία πηγή σταθερού ρεύματος (όπως και το Q11 που εξηγήσαμε προηγουμένως). Η αντίσταση R6 είναι αυτή που μπορεί να ρυθμίσει το ρεύμα που δημιουργεί το τρανζίστορ αυτό. Οι αντιστάσεις R17 και R18 αποτελούν το δίκτυο ανάδρασης και μέσω αυτών καθορίζεται το κέρδος του ενισχυτή. Η εφαρμογή ανάδρασης σε έναν ενισχυτή μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα αστάθειας. Η θετική ανάδραση προκαλεί ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Ακόμα όμως και στην περίπτωση εφαρμογής αρνητικής ανάδρασης υπάρχει το ενδεχόμενο αστάθειας, εάν η έξοδος είναι μετατοπισμένη κατά  $180^\circ$ , σε σχέση με την είσοδο, κάτι που ισοδυναμεί με θετική ανάδραση. Για να αποφευχθεί η αστάθεια σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η συχνότητα που η φάση θα έχει γίνει  $-180^\circ$ , το κέρδος θα είναι μικρότερο από 0dB. Γι' αυτό το λόγο στο κύκλωμα τοποθετούνται οι δύο πυκνωτές έτσι ώστε στις συχνότητες μέχρι το επιθυμητό εύρος ζώνης το κέρδος να είναι το προσδοκώμενο, ενώ στις υψηλές συχνότητες να εμφανίζεται μείωση του κέρδους.

Ακολουθεί το διάγραμμα των σημάτων τάσης εισόδου και εξόδου του κυκλώματος καθώς και της έντασης ρεύματος του σήματος εξόδου.



3-21 Σήματα εισόδου - εξόδου

### 3.5.2. Υπολογισμός Βασικών Παραμέτρων

Στο παραπάνω κύκλωμα παρατηρούμε ότι έχουμε μία κατανάλωση 7.219A από την πηγή τάσης V1 και 7.007A από την πηγή τάσης V2. Οπότε η κατανάλωση σε Watt του ενισχυτή είναι:

$$P_1 = V_1 * I_1 = 12 * 7.219 = 86.628W$$

$$P_2 = V_2 * I_2 = 12 * 7.007 = 84.084W$$

$$P_{in} = P_1 + P_2 = 86.628 + 84.084 = 170.712W$$

Στο σήμα εξόδου παρατηρούμε ότι το ημίτονο έχει πλάτος τάσης 8V και πλάτος ρεύματος 1A. Επομένως για την ενεργό τιμή της ισχύος στην έξοδο έχουμε:

$$V_{rms} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} = \frac{8}{\sqrt{2}} = 5.67V$$

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{R_{load}} = \frac{5.67^2}{8} = \frac{32.1489}{8} = 4.018W$$



Βλέπουμε δηλαδή ότι ο ενισχυτής μας έχει πολύ μικρή ισχύ εξόδου σε σχέση με την ισχύ που καταναλώνει στην είσοδο του. Ακολουθεί η μέτρηση της απόδοσης του ενισχυτή.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{4.018}{170.712} = 0.023,$$

δηλαδή η απόδοση του ενισχυτή μας είναι 2.3%

## 4. Ενισχυτής Τάξης D

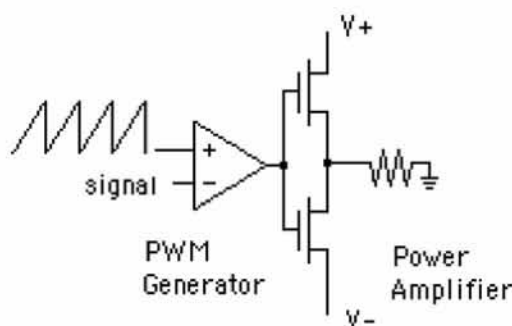
### 4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε έναν ενισχυτή τάσης A ο οποίος θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχει πάρα πολλές ομοιότητες με τους υπόλοιπους ενισχυτές της κατηγορίας του όπως είναι ο ενισχυτής τάξης B και ο ενισχυτής τάξης AB. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε μία διαφορετική τοπολογία από όλες τις άλλες, την τοπολογία του ενισχυτή τάξης D, η οποία έχει πάρα πολύ καλά αποτελέσματα.

Ο ενισχυτής τάξης D έχει πολύ καλά αποτελέσματα εξαιτίας του γεγονότος ότι το στάδιο εξόδου λειτουργεί σαν ένας διακόπτης ON-OFF, ο οποίος συνδέει και αποσυνδέει συνεχώς την πηγή ρεύματος στο φορτίο. Το γεγονός όμως αυτό συνεπάγεται ότι το ενισχυμένο σήμα δεν μπορεί να φέρει τις πληροφορίες του σήματος εισόδου. Γι αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιείται Pulse Width Modulation (PWM) στην οποία το πλάτος του παλμού μεταβάλλεται σε αναλογία με το πλάτος του σήματος εισόδου. Παρακάτω θα δείξουμε το πώς λειτουργεί η διαμόρφωση αυτή.

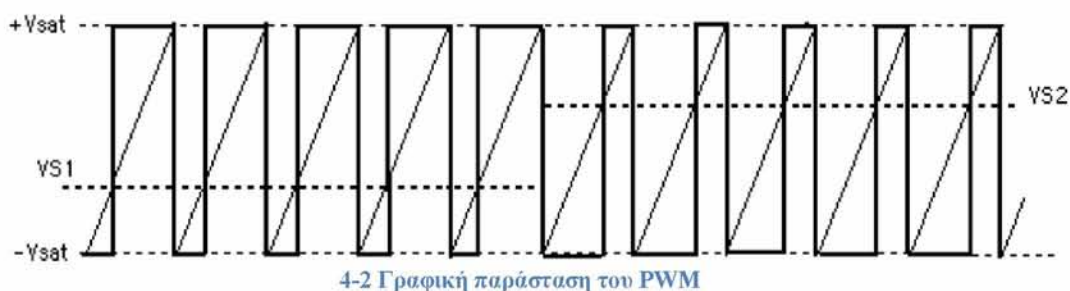
### 4.2 Pulse-Width Modulation (PWM)

Η βασική δομή του PWM διαμορφωτή είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4-1.



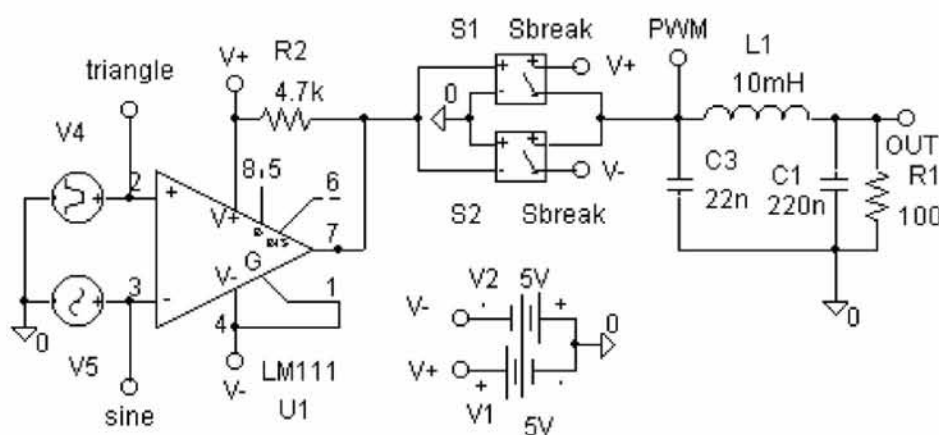
4-1 Βασική δομή του PWM

Μία τριγωνική κυματομορφή αποτελεί την μία είσοδο του ενισχυτή-συγκριτή και χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία του σήματος που εφαρμόζεται στην άλλη είσοδο. Ας υποθέσουμε ότι για μια στιγμή εφαρμόζεται μία σταθερή τάση (εντός της περιοχής του τριγωνικού παλμού) στην αναστρέφουσα είσοδο. Τότε για το αρχικό τμήμα της περιόδου το σήμα θα είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του τριγώνου και η έξοδος του συγκριτή θα είναι  $-V_{sat}$ . Για το υπόλοιπο της περιόδου η έξοδος του συγκριτή θα είναι  $+V_{sat}$ . Η κατάσταση απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Για τις πέντε πρώτες περιόδους εφαρμόζεται μία σταθερή τάση  $V_{S1}$  και για τις επόμενες πέντε περιόδους μια τάση  $V_{S2}$ . Επίσης, η περίοδος του τριγωνικού παλμού πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από την περίοδο του σήματος, έτσι ώστε σε κάθε περίοδο του τριγώνου ο παλμός του σήματος να αλλάζει κατά πολύ λίγο.



### 4.3 Ενισχυτής τάξης D

Στο σχήμα 4-3 που ακολουθεί δίνουμε την γενική μορφή του ενισχυτή τάξης D που προσομοιώσαμε στο PSpice.

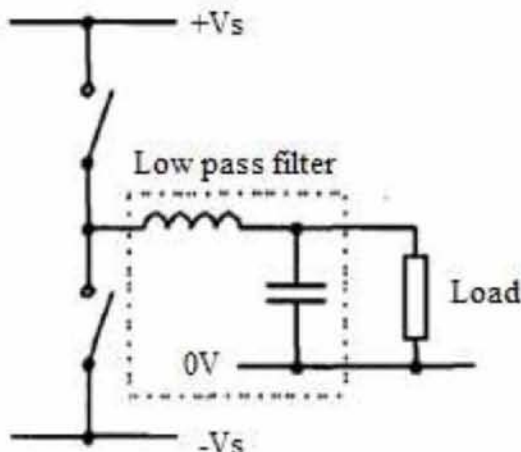


Στο συγκεκριμένο κύκλωμα εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή LM111 μία τριγωνική κυματομορφή. Το τριγωνικό τμήμα αυτής καθορίζεται κυρίως από τον χρόνο ανόδου, ενώ ταυτόχρονα δίνουμε μικρό πλάτος στον παλμό και μικρό χρόνο καθόδου. Η περίοδος είναι ίση με το άθροισμα του χρόνου ανόδου και καθόδου και του πλάτους του παλμού. Η περίοδος που χρησιμοποιούμε είναι μια συμβατική λύση έτσι ώστε να έχουμε ορατά αποτελέσματα, αλλά και να μην αλλοιώνεται ιδιαίτερα το σήμα το οποίο θέλουμε να ενισχύσουμε κατά την διάρκεια μίας τριγωνικής περιόδου. Το σήμα το οποίο θα ενισχύσουμε και το οποίο θα πρέπει να είναι μικρότερου μεγέθους εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή.

Η έξοδος του ενισχυτή μας είναι ένας PWM παλμός, ο οποίος χρησιμοποιείται για να οδηγήσει ένα κλάσης Β στάδιο ισχύος το οποίο και θα είναι και το στάδιο εξόδου του ενισχυτή μας. Στο σχήμα αυτό παριστάνεται με διακόπτες οι οποίοι στο κύκλωμα το οποίο θα σχεδιαστεί στο PSpice και θα δοθεί παρακάτω θα αντικατασταθούν από MOSFET. Τέλος, για να πάρουμε το σήμα εισόδου που δώσαμε στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή μας ενισχυμένο κατά πλάτος και χωρίς να έχουν αλλοιωθεί ιδιαίτερα τα υπόλοιπα στοιχεία του θα πρέπει να τοποθετήσουμε ένα φίλτρο, αμέσως μετά από το στάδιο ισχύος. Το ρόλο αυτό παίζει το βαθυπερατό φίλτρο LC.

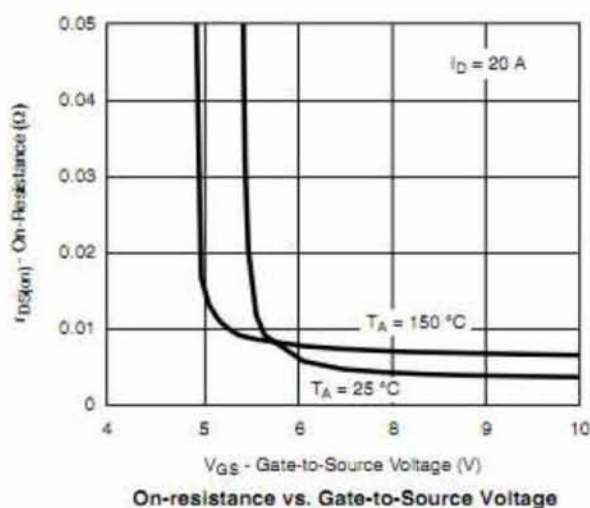
#### 4.4 Διάταξη Mosfet του σταδίου Ισχύος

Για να οδηγήσει ένας ενισχυτής ένα μεγάφωνο, το οποίο εμφανίζει μικρή εμπέδηση χρειάζεται σχεδίαση κατάλληλου σταδίου εξόδου. Στους ενισχυτές τάξεως D χρησιμοποιείται μία διάταξη διακοπτικών στοιχείων.



4-4 Διάταξη διακοπτικών στοιχείων

Το ρόλο των διακοπτικών στοιχείων παίζουν συνήθως τα mosfet, παλιότερα χρησιμοποιήθηκαν λυχνίες και διπολικά τρανζίστορ. Τα mosfet λειτουργούν μεταξύ των καταστάσεων cut-off και saturation, όπου εμφανίζεται πολύ μικρή αντίσταση αγωγής, κάτι που φαίνεται και στην χαρακτηριστική καμπύλη τους που ακολουθεί. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεγάλη ενεργειακή απόδοση λόγω των μικρών ωμικών απωλειών.

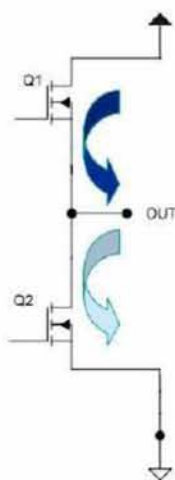


4-5 Χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης Mosfet

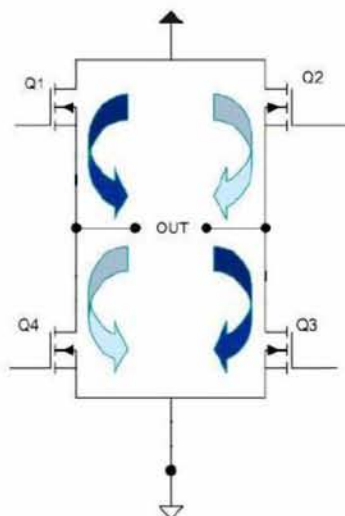
Οι τάξεις D ενισχυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τοπολογίες, μισής γέφυρας (half-bridge) και ολόκληρης γέφυρας (full-bridge), ανάλογα με την τοπολογία των διακοπτικών στοιχείων στην έξοδο. Οι τοπολογίες αυτές δίνονται



παρακάτω. Στην half-bridge είτε άγει το  $Q_1$  είτε το  $Q_2$ . Αντίθετα στην full-bridge τοπολογία άγουν είτε το  $Q_1$  και το  $Q_3$  είτε το  $Q_2$  και το  $Q_4$ .



4-6 Τοπολογία μισής γέφυρας



4-7 Τοπολογία ολόκληρης γέφυρας

Κάθε τοπολογία έχει τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της. Η half-bridge τοπολογία είναι ουσιαστικά πιο απλή, ενώ η full-bridge είναι ιδανικότερη για ακουστικές εφαρμογές. Η full-bridge τοπολογία απαιτεί δύο half-bridge τοπολογίες και άρα περισσότερα στοιχεία.

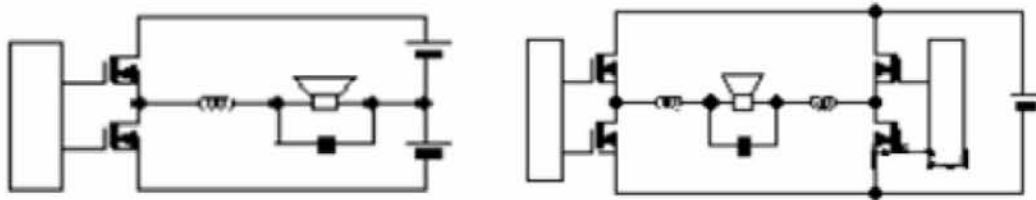
Ωστόσο η διαφορετική δομή που παρουσιάζει η full-bridge της δίνει την δυνατότητα να ακυρώσει παραμορφώσεις όπως τις αρμονικές συνιστώσες άρτιας τάξης και τα DC offsets. Στην τοπολογία αυτή είναι δυνατή η χρήση μιας καλύτερης PWM διαμόρφωσης, όπως π.χ. τρία επίπεδα PWM, γεγονός που προσφέρει λιγότερα σφάλματα κατά την διαδικασία της κβαντοποίησης.

Στην half-bridge τοπολογία υπάρχει περίπτωση να επηρεαστεί η τροφοδοσία λόγω της ενέργειας που επιστρέφεται πίσω από τον ενισχυτή, με αποτέλεσμα σοβαρές διακυμάνσεις της τάσης στις γραμμές τροφοδοσίας, όταν ο ενισχυτής στέλνει χαμηλής συχνότητας σήματα στο φορτίο. Αυτή η επιστρεφόμενη ενέργεια είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό του τάξης D ενισχυτή. Σε αντίθεση στην full-bridge τοπολογία τα συμπληρωματικά mosfet τείνουν να καταναλώσουν την ενέργεια αυτή και έτσι αυτή δεν γυρίζει πίσω στην τροφοδοσία.

Συνολικά τα χαρακτηριστικά της κάθε τοπολογίας συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

	HB	FB
Απαιτούμενη τροφοδοσία	Συμμετρική	Απλή
Προδιαγραφές για ένταση ρεύματος	1	2
Αριθμός τρανζίστορ	2 ανά κανάλι	4 ανά κανάλι
Γραμμικότητα	-	Δεν εμφανίζει άρτιες αρμονικές
Τάση DC στην έξοδο	Απαιτείται ρύθμιση	Μπορεί να εξαλειφθεί εύκολα
Χρήση με PWM	2 <sup>ου</sup> επιπέδου	Όλοι οι δυνατοί τρόποι διαμόρφωσης κατά PWM μπορούν να υλοποιηθούν
	Για βέλτιστη απόδοση απαιτείται χρήση ανάδρασης	Κατάλληλη για ενισχυτές ανοιχτού βρόχου

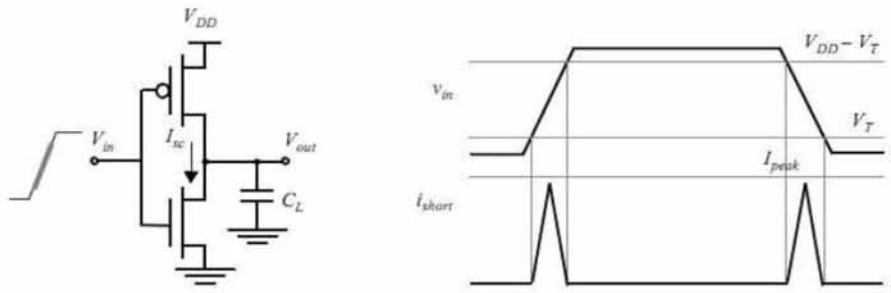
Παρακάτω δίνεται ο τρόπος σύνδεσης του μεγαφώνου σε κάθε μία από τις δύο τοπολογίες



4-8 Σύνδεση μισής και ολόκληρης γέφυρας

#### 4.4.1. Νεκρός χρόνος

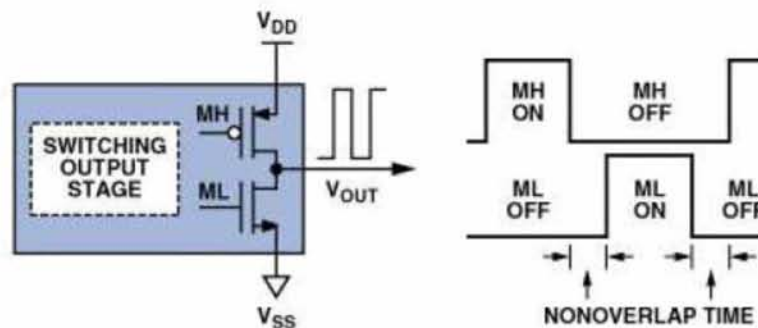
Τα δύο mosfet έχουν πολύ χαμηλή αντίσταση όταν άγουν. Είναι όμως πολύ σημαντικό να αποφεύγονται καταστάσεις όπου άγουν και τα δύο ταυτόχρονα, διότι μπορεί να δημιουργηθεί μονοπάτι χαμηλής αντίστασης από την VDD στην VSS διαμέσου των τρανζίστορ συνεπώς και μεγάλο ρεύμα (ρεύμα βραχυκύκλωσης). Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το ρεύμα βραχυκύκλωσης δημιουργείται κατά την μετάβαση αγωγής από το ένα τρανζίστορ στο άλλο και οφείλεται στις πεπερασμένες τάσεις κατωφλίου.



4-9 Ρεύμα βραχυκύκλωσης

Στην καλύτερη περίπτωση τα τρανζίστορ θα ζεσταθούν αρκετά και θα έχουν μεγάλες απώλειες, ενώ στην χειρότερη περίπτωση μπορεί και να καταστραφούν. Για αποφυγή αυτής της περίπτωσης πριν ξεκινήσει να άγει ένα από τα δύο τρανζίστορ, θα πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα όπου δεν άγει κανένα. Ο χρόνος κατά την διάρκεια του οποίου είναι και τα δύο κλειστά αναφέρεται ως νεκρός χρόνος.

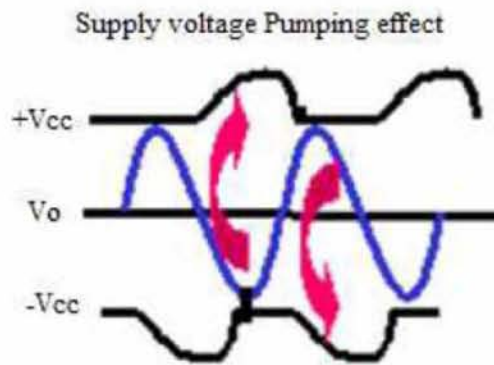
Εισάγοντας λοιπόν νεκρό χρόνο για να αποφευχθούν τα μεγάλα ρεύματα, δημιουργείται μία χρονική καθυστέρηση στους παλμούς, που εισάγει μη γραμμικότητες στο κύκλωμα, προκαλώντας επιπλέον παραμόρφωση ανάλογη της διαφοράς του νεκρού χρόνου από το πλάτος του παλμού. Η χρυσή τομή είναι να επιτευχθεί ο ελάχιστος νεκρός χρόνος, που θα εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει ρεύμα βραχυκύκλωσης αλλά και θα μειώνει τις παραμορφώσεις στο ελάχιστο.



4-10 Νεκρός χρόνος

#### 4.4.2. Ενέργεια επιστρεφόμενη από τον ενισχυτή

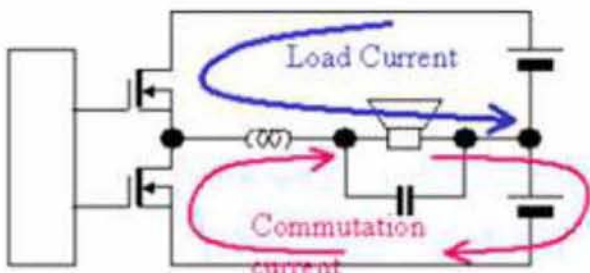
Όταν η half-bridge τοπολογία τροφοδοτεί με χαμηλή συχνότητα στην έξοδο το φορτίο, τότε ένα ποσοστό της ενέργειας γυρίζει πίσω στην τροφοδοσία με αποτέλεσμα να προκαλεί διακυμάνσεις σε αυτήν και κατά συνέπεια να προκαλείται παραμόρφωση στην έξοδο. Η ενέργεια αυτή που μεταφέρεται στην τροφοδοσία προέρχεται από το πηνίο του κατωδιαβατού φίλτρου(ήταν εκεί αποθηκευμένη). Συνήθως η τροφοδοσία δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει την ενέργεια αυτή με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διακυμάνσεις σε αυτή. Αυτή η ενέργεια δεν εμφανίζεται στην full-bridge τοπολογία, αφού εκεί βρίσκεται διέξοδο στον άλλο διακοπτικό δρόμο κάθε φορά.



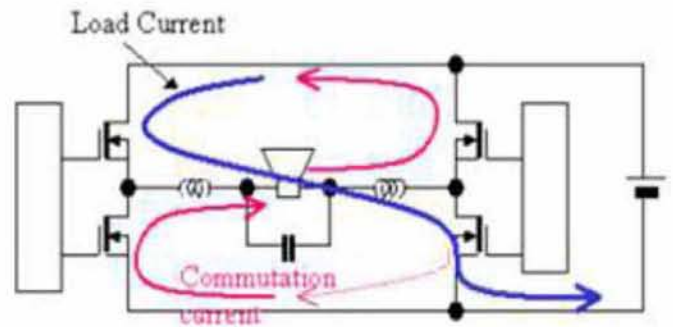
$$\Delta V_{BUSmax} = \frac{V_{BUS}}{8\pi f R_{LOAD} C_{BUS}}$$

4-11 Φαινόμενο διακύμανσης τάσης τροφοδοσίας

Παρακάτω δείχνουμε σχηματικά το πρόβλημα που δημιουργούν τα ρεύματα διαφυγής τόσο στην τοπολογία μισής γέφυρας όσο και στην ολόκληρη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές όταν το φορτίο έχει χαμηλή εμπέδηση και χαμηλές χωρητικότητες στις γραμμές τροφοδοσίας. Ακόμα πιο έντονο είναι για duty cycle 25% και 75%.



4-12 Ρεύματα στην τοπολογία μισής γέφυρας

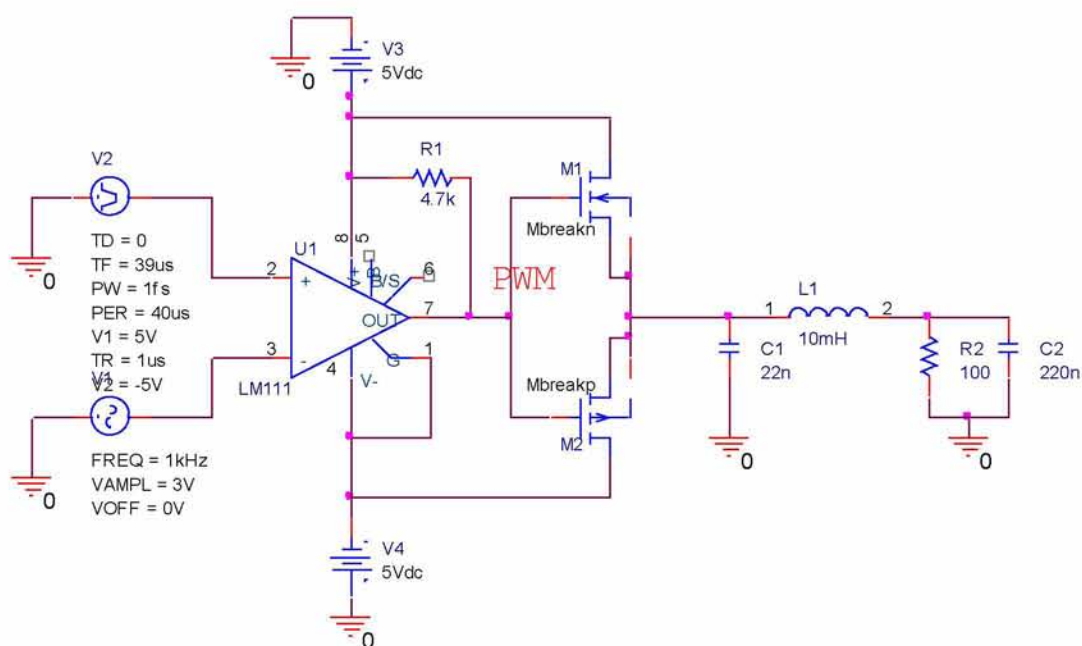


4-13 Ρεύματα στην τοπολογία ολόκληρης γέφυρας



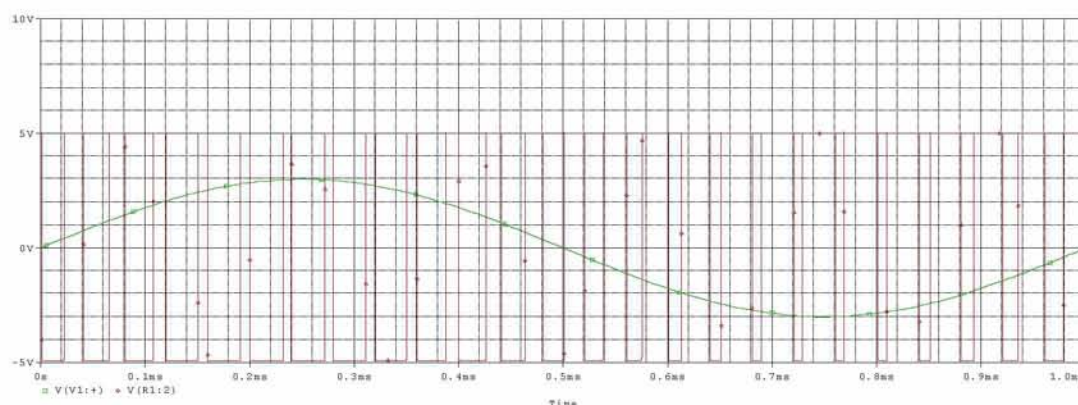
## 4.5 Κύκλωμα

Στο σχήμα 4-14 που δίνουμε παρακάτω είναι το κύκλωμα όπως ακριβώς το σχεδιάσαμε στο Pspice. Στο κύκλωμα αυτό έχουμε αντικαταστήσει τα διακοπτικά στοιχεία του σταδίου εξόδου με MOSFET όπως ακριβώς περιγράψαμε και προηγουμένως. Τα χαρακτηριστικά για τα MOSFET που καθορίσαμε στο μοντέλο είναι τα εξής:  $K_p=0.3$ ,  $V_{to}=\pm 4$ ,  $w=2u$ ,  $l=1u$ ,  $\lambda=0.027$ . Το τριγωνικό σήμα είναι ένας παλμός με χρόνο ανόδου 39msec και περίοδο και χρόνο πτώσης για το καθένα 0.5msec.

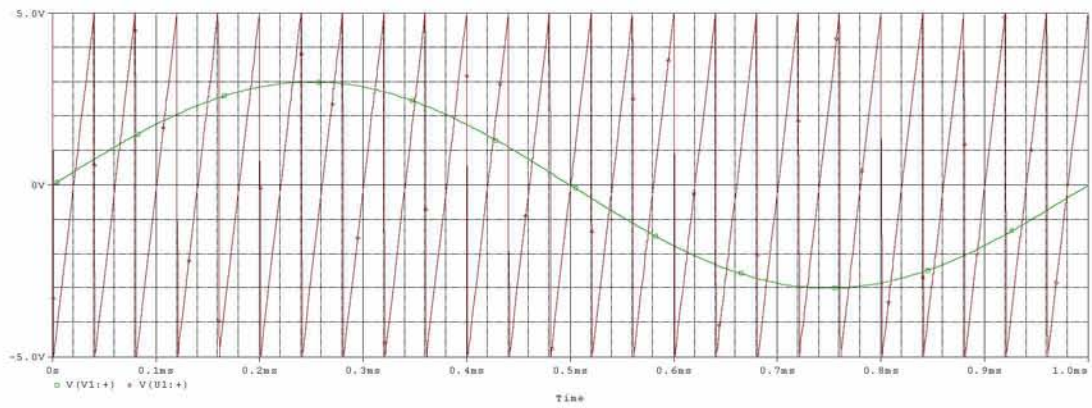


4.5-14 Κύκλωμα ενισχυτή τάξης D στο PSpice

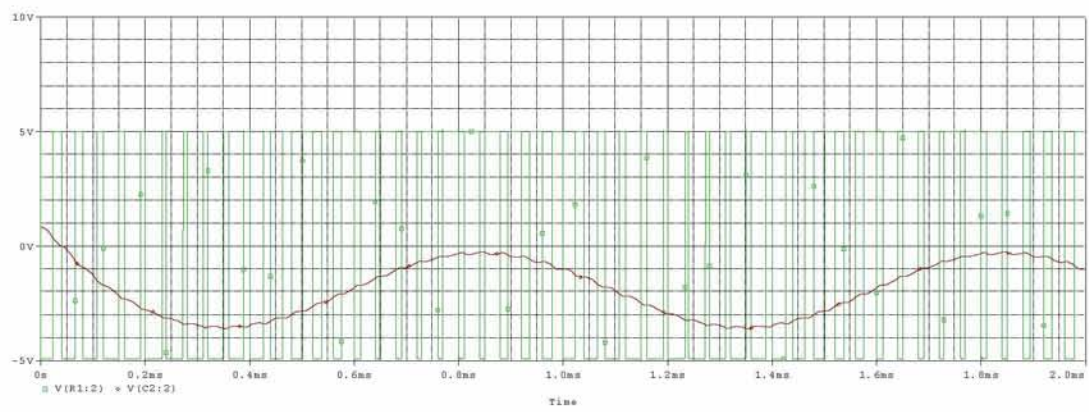
Παρακάτω δίνουμε διάφορα διαγράμματα κυματομορφών των σημάτων εισόδου και εξόδου του κυκλώματος.



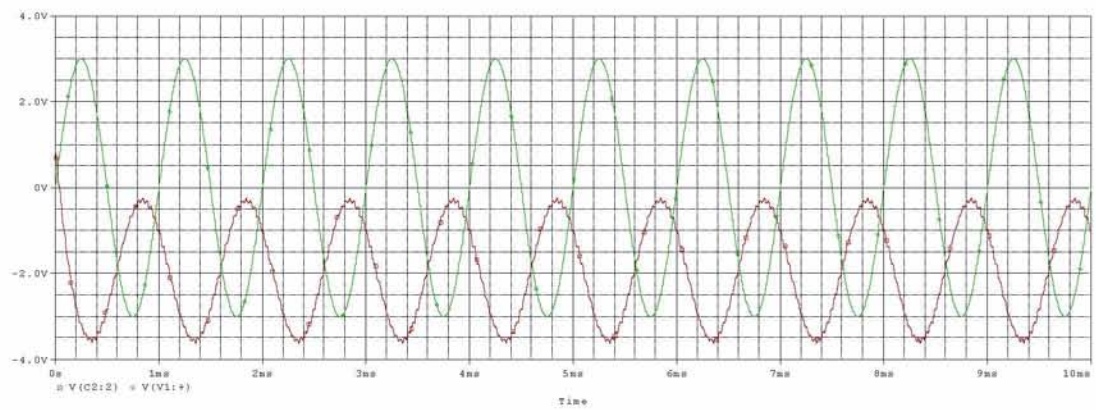
4.5-15 PWM και sine input



4.5-16 Triangle και sine input



4.5-17 PWM και Out signal



4.5-18 Sine input και Out signal

## 5. Ενισχυτής AD

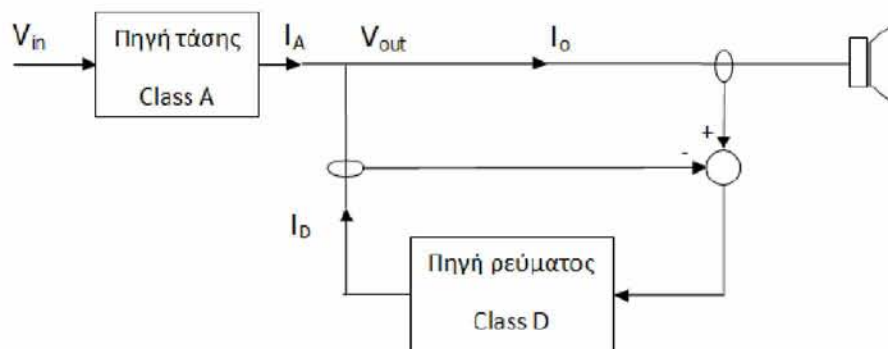
### 5.1 Εισαγωγή

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ένας ενισχυτής ήχου είναι να έχει υψηλή απόδοση και μικρή παραμόρφωση.

Οι ενισχυτές τάξης A έχουν χαμηλή απόδοση, αλλά και μεγάλη γραμμικότητα. Μεγάλη γραμμικότητα σημαίνει χαμηλή παραμόρφωση. Αντιστρόφως οι ενισχυτές τάξης D έχουν υψηλή απόδοση χρησιμοποιώντας PWM διαμόρφωση, αλλά υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης. Στον ενισχυτή τάξης AD γίνεται προσπάθεια για ένωση των δύο ενισχυτών με σκοπό την εκμετάλλευση των θετικών τους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενισχυτή με υψηλή απόδοση και υψηλή αξιοπιστία.

### 5.2 Δομή ενισχυτή AD

Σκοπός της σχεδίασης είναι να εφοδιάσει τον ενισχυτή με υψηλή γραμμικότητα, δηλαδή χαμηλό επίπεδο θορύβου, αλλά ταυτόχρονα με χαμηλή εμπέδηση εξόδου και μεγάλη απόδοση. Στο σχήμα 5-1 που ακολουθεί δίνεται το διάγραμμα της δομής του ενισχυτή.



5.2-1 Δομή ενισχυτή τάξης AD

Η τάση εξόδου του κυκλώματος εξαρτάται αποκλειστικά από την πηγή τάσης. Συνεπώς το ρεύμα που ρέει προς το φορτίο καθορίζεται από την πηγή τάσης. Άρα πρέπει η πηγή τάσης να είναι όσο το δυνατόν πιο γραμμική. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ως πηγή τάσης ο ενισχυτής τάξης A.

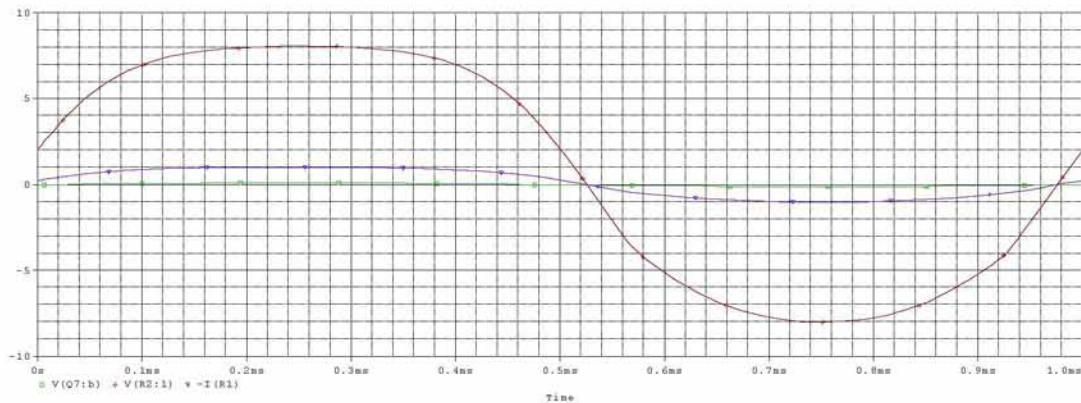
Οι ενισχυτές τάξης A αν και χαρακτηρίζονται από υψηλή γραμμικότητα έχουν χαμηλή απόδοση, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τοποθετώντας την πηγή ρεύματος έτσι ώστε η έξοδος της να είναι ανάλογη του ρεύματος της πηγής τάσης, εξασφαλίζεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ρεύματος άρα και της ισχύος, που παρέχεται στο φορτίο παρέχεται από την πηγή ρεύματος. Αν λοιπόν η πηγή ρεύματος έχει υψηλή απόδοση τότε θα έχει και το συνολικό κύκλωμα υψηλή απόδοση. Οπότε χρησιμοποιείται ως πηγή ρεύματος ο ενισχυτής τάξης D.

Έτσι με τον συνδυασμό των δύο επιτυγχάνεται η γραμμικότητα ενός ενισχυτή τάξης A συνδυασμένη με την υψηλή απόδοση ενός ενισχυτή τάξης D.



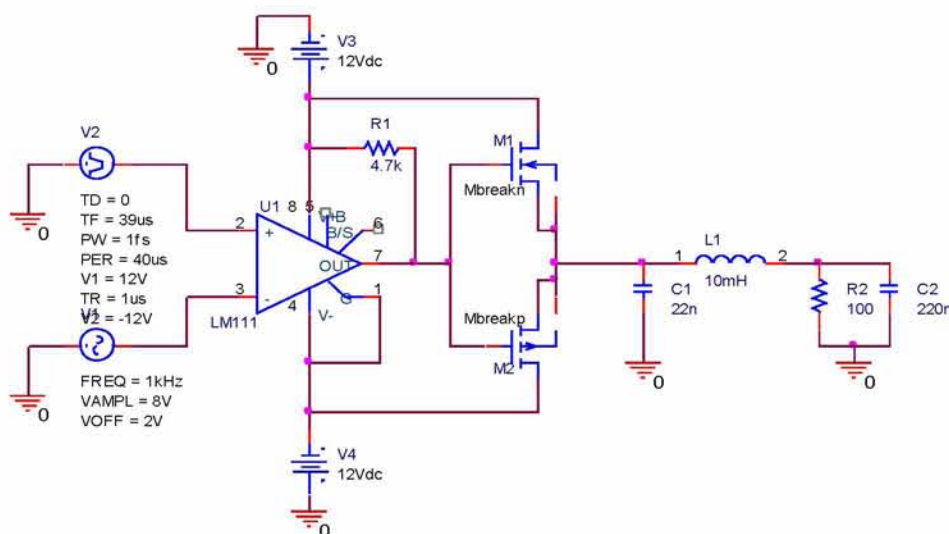
### 5.3 Προσομοιώσεις στο PSpice

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ενώσουμε τους δύο ενισχυτές τους οποίους και παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια. Θα πρέπει όμως να προσαρμόσουμε κατάλληλα τις τιμές έτσι ώστε ή έξοδος του ενός να είναι η κατάλληλη είσοδος για τον άλλο. Γι αυτό το λόγο θα δώσουμε στον ενισχυτή τάξης A ως είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 100mVolt και συχνότητας 1kHz. Όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω διάγραμμα ο ενισχυτής τάξης A μας δίνει ως έξοδο ένα πάλι ημιτονοειδές σήμα με πλάτος αυτή τη φορά 8Volt.



5.3-2 Έξοδος ενισχυτή τάξης A

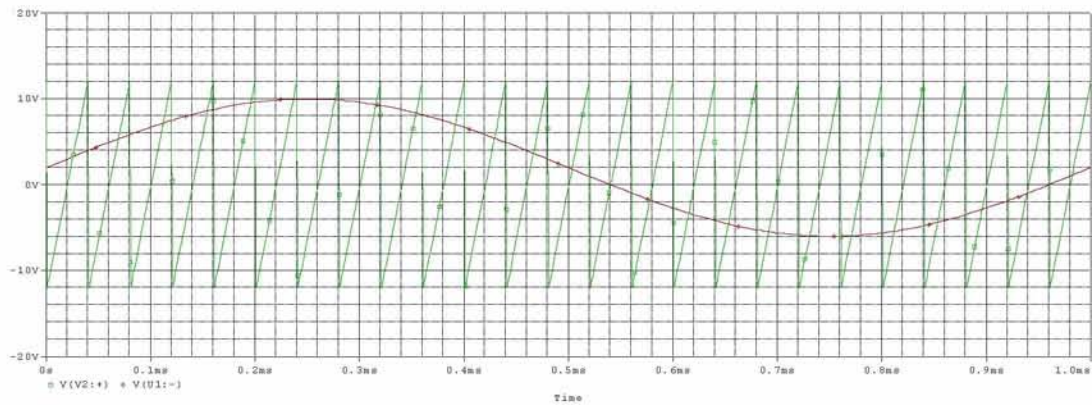
Επομένως θα πρέπει να διαμορφώσουμε κατάλληλα τον ενισχυτή τάξης D έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει με σήμα εισόδου πλάτους 8Volt. Γι αυτό το λόγο αλλάζουμε τον παλμό του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου σε πλάτος 8Volt και ταυτόχρονα αυξάνουμε τις τάσεις τροφοδοσίας του ενισχυτή LM111 από 5 σε 12 volt. Επίσης αυξάνουμε τις αντίστοιχες τάσεις μέσα στις οποίες λειτουργεί η τριγωνική κυματομοφή, ώστε να είναι πάντα μεγαλύτερες από το πλάτος του σήματος εισόδου το οποίο και θέλουμε να ενισχύσουμε. Δίνουμε και 2 Volt offset μιας και το σήμα εξόδου του τάξης A είναι μετατοπισμένο.



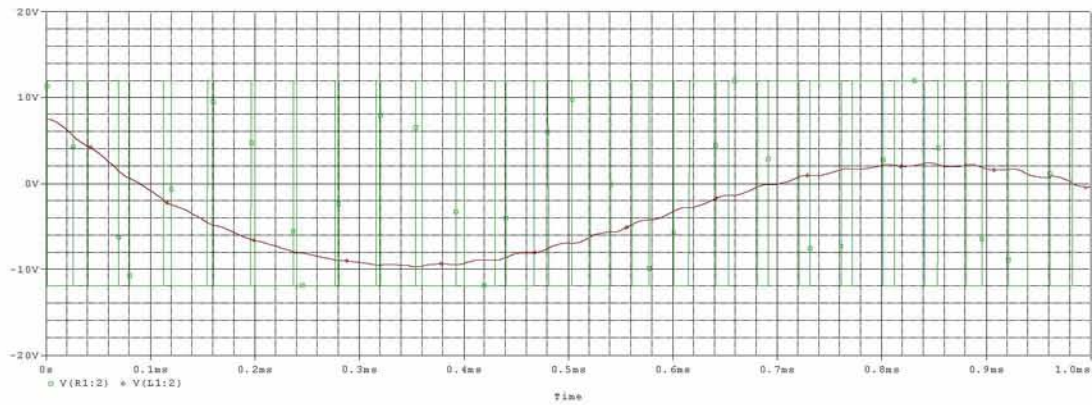
5.3 Τροποποιημένο κύκλωμα ενισχυτή τάξης D



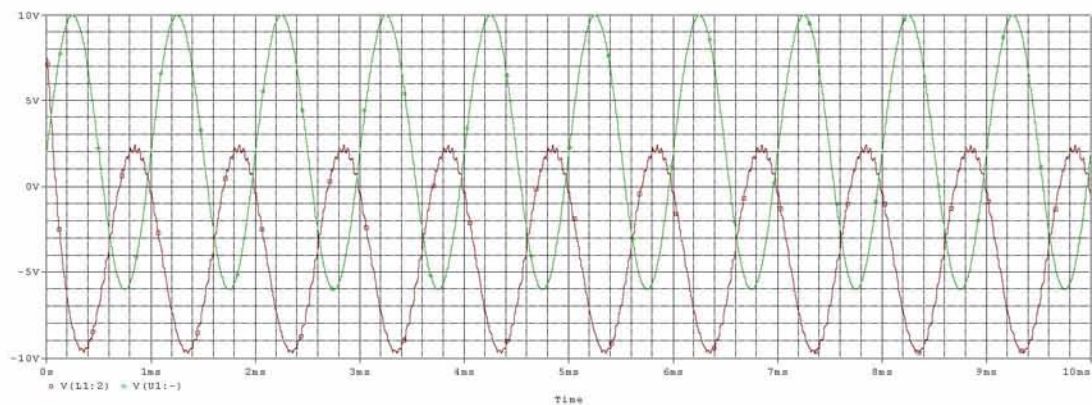
Παρακάτω δίνουμε ορισμένες από τις κυματομορφές των σημάτων του τροποποιημένου ενισχυτή τάξης D.



5.3-4 Triangle και sine input

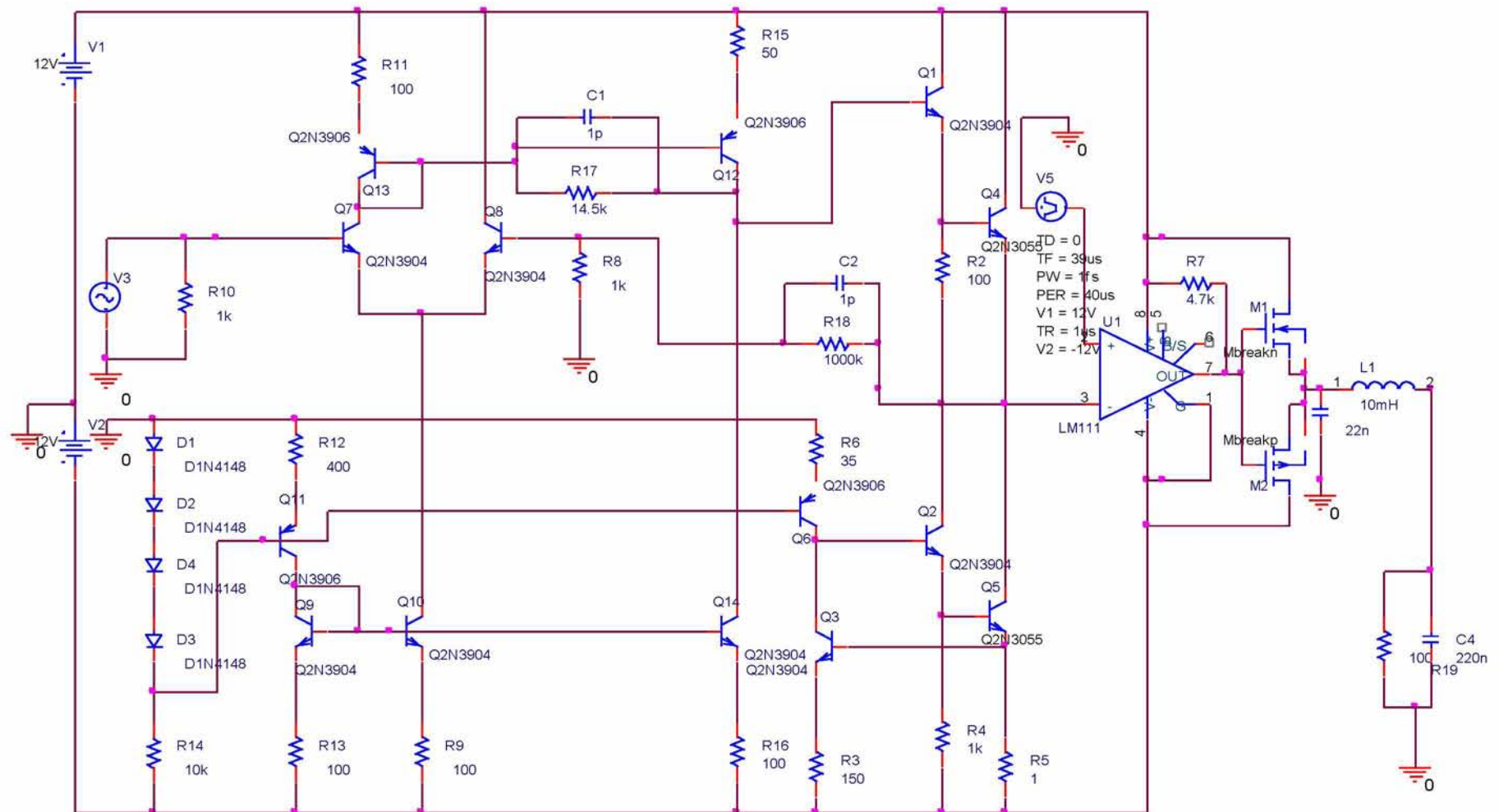


5.3-5 PWM και output signal



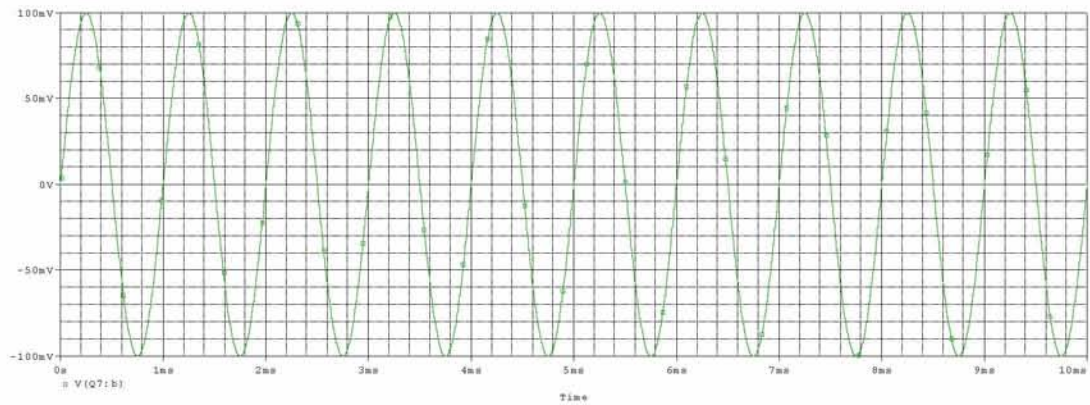
5.3-6 Input και output signal

Παρακάτω θα δώσουμε την κυκλωμάτωση όλου του ενισχυτή όπου έχουν ενωθεί και οι δύο ενισχυτές που έχουμε περιγράψει μέχρι στιγμής.

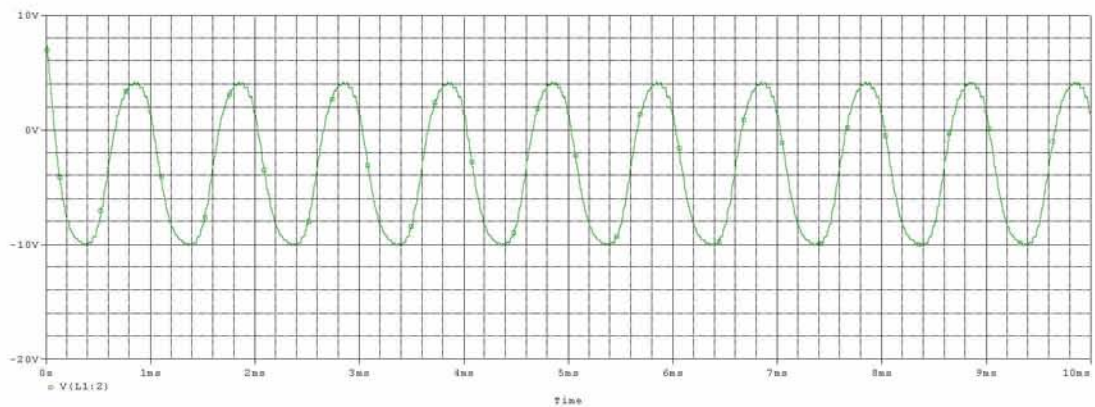


5.3-7 Ενισχυτής τάξης AD

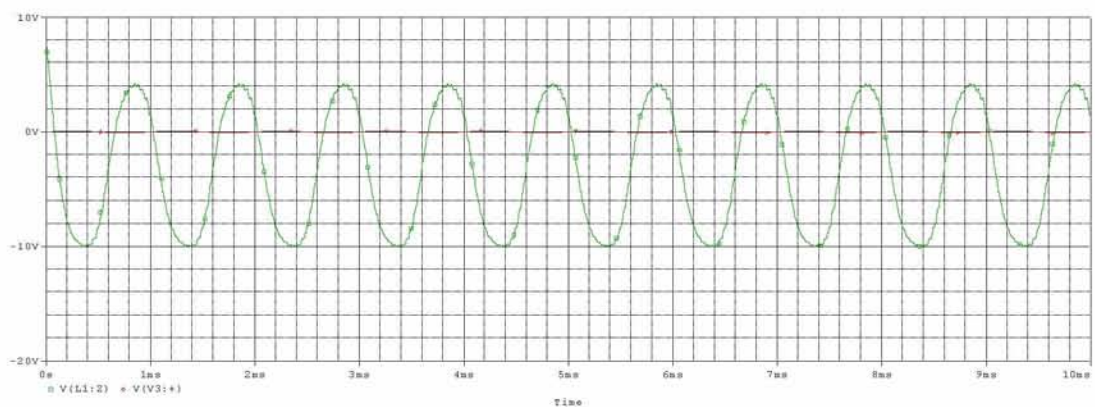
Παρακάτω θα δώσουμε διάφορα διαγράμματα από τις κυματομορφές του κυκλώματος.



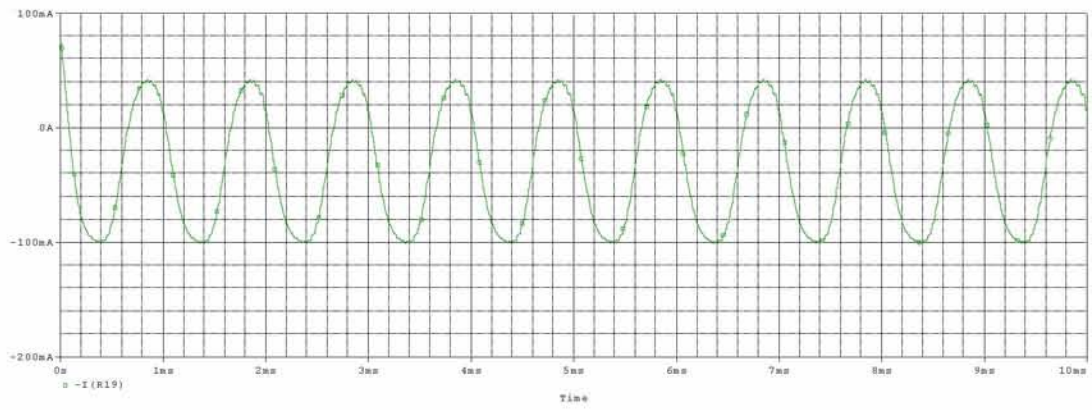
5.3-8 Input signal



5.3-9 Output signal



5.3-10 Input και output signal



5.3-11 Κυματομορφή ρεύματος εξόδου

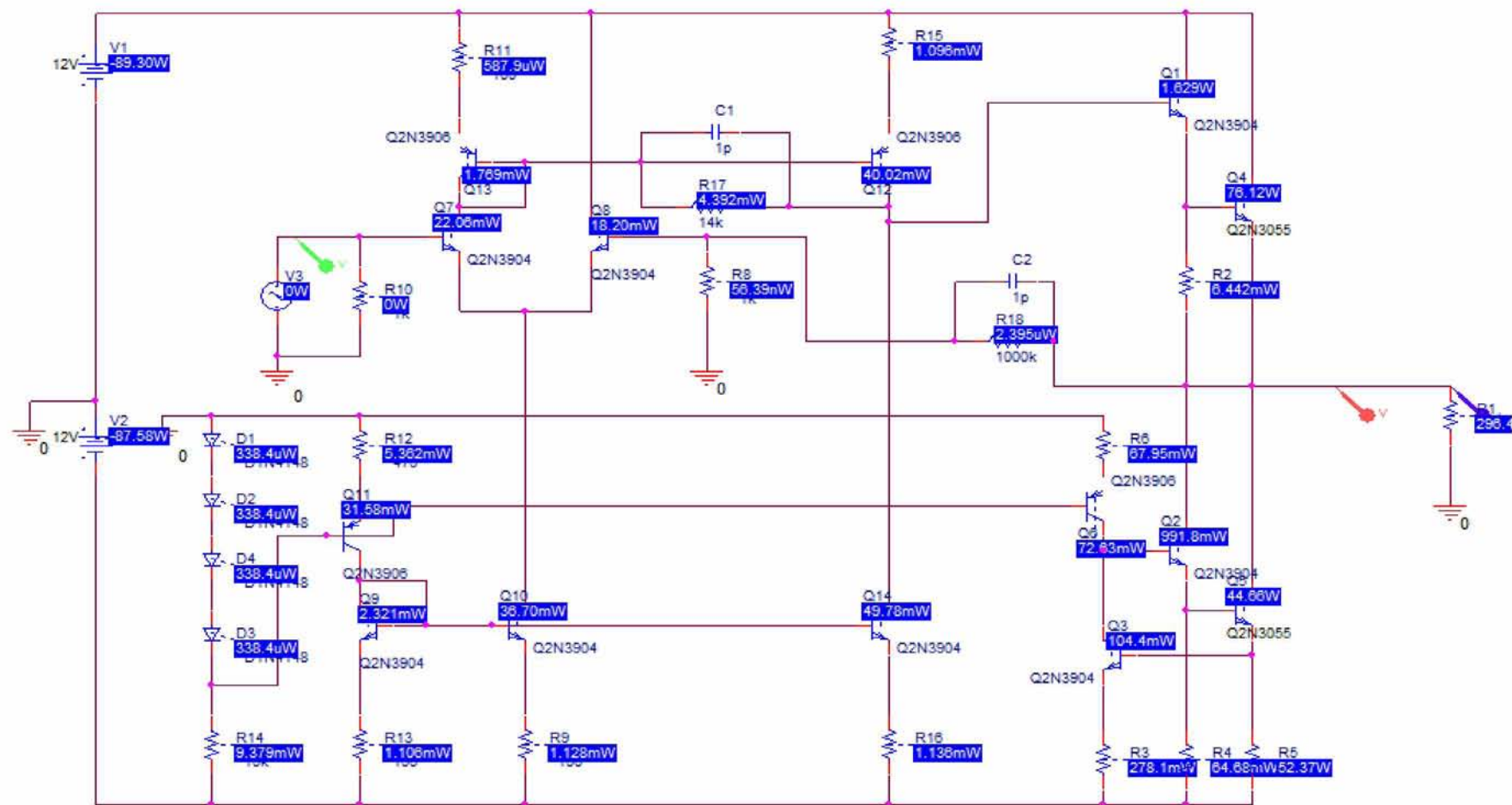


## 6. Σχεδίαση και κατασκευή πλακέτας ενισχυτή τάξης A

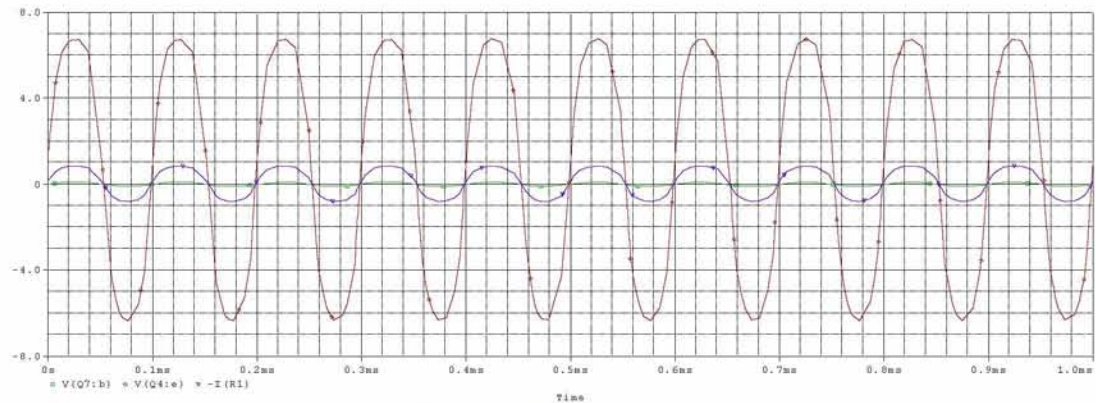
### 6.1.1. Σχεδίαση του Layout του ενισχυτή

Στην παρούσα πτυχιακή θα σχεδιάσουμε και στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε την πλακέτα για τον ενισχυτή τάξης A. Επειδή έχουμε χρησιμοποιήσει υλικά που δεν υπάρχουν στο εμπόριο με την συγκεκριμένη τιμή που εμείς έχουμε επιλέξει θα πρέπει να τα αντικαταστήσουμε με την πλησιέστερη τιμή τους που μπορούμε να βρούμε. Πρόκειται για την αντίσταση R12 που θα αντικατασταθεί με μία των 470 Ohm, την αντίσταση R6 που θα αντικατασταθεί με μία των 33 Ohm καθώς και τις αντιστάσεις R17 και R18 που θα αντικατασταθούν με τρίμμερ των 22K και 1M αντίστοιχα, έτσι ώστε να μπορούμε να ρυθμίζουμε την ανάδραση στο επιθυμητό σημείο.

Παρακάτω θα δώσουμε ξανά το κύκλωμα με τις νέες πλέον τιμές αντιστάσεων και θα τρέξουμε μία εξομοίωση του στο πρόγραμμα προσομοίωσης έτσι ώστε να δούμε τα αποτελέσματα που θα πρέπει να αναμένουμε εφόσον κατασκευάσουμε την πλακέτα του κυκλώματος. Στην συγκεκριμένη εξομοίωση φαίνεται και η κατανάλωση σε κάθε ένα σημείο του κυκλώματος. Παρατηρούμε ότι πάνω σε κάθε αντίσταση έχουμε μια κατανάλωση κάποιων λίγων milliwatt. Εξαίρεση αποτελεί η αντίσταση R5 στην οποία η κατανάλωση φτάνει τα 52.3Watt. Έτσι στην πλακέτα που θα κατασκευάσουμε όλες οι αντιστάσεις που θα τοποθετηθούν θα είναι  $\frac{1}{4}$  Watt, ενώ για την αντίσταση R5 θα πρέπει να βρούμε μία αντίστοιχη σε μέγεθος. Επειδή όμως στο εμπόριο οι αντιστάσεις κυκλοφορούν μόνο μέχρι 17 Watt θα αναγκαστούμε να κατασκευάσουμε την συγκεκριμένη αντίσταση. Θα παραλληλίσουμε 10 αντιστάσεις των 10 Ohm η κάθε μια, εκ των οποίων οι 5 θα είναι από 10 Watt και οι άλλες 5 από 17 Watt. Έτσι θα έχουμε μία αντίσταση 1 Ohm των 135 Watt. Παρακάτω επίσης φαίνεται το διάγραμμα των σημάτων εισόδου και εξόδου που μας δίνει το κύκλωμα με τις νέες αντιστάσεις.

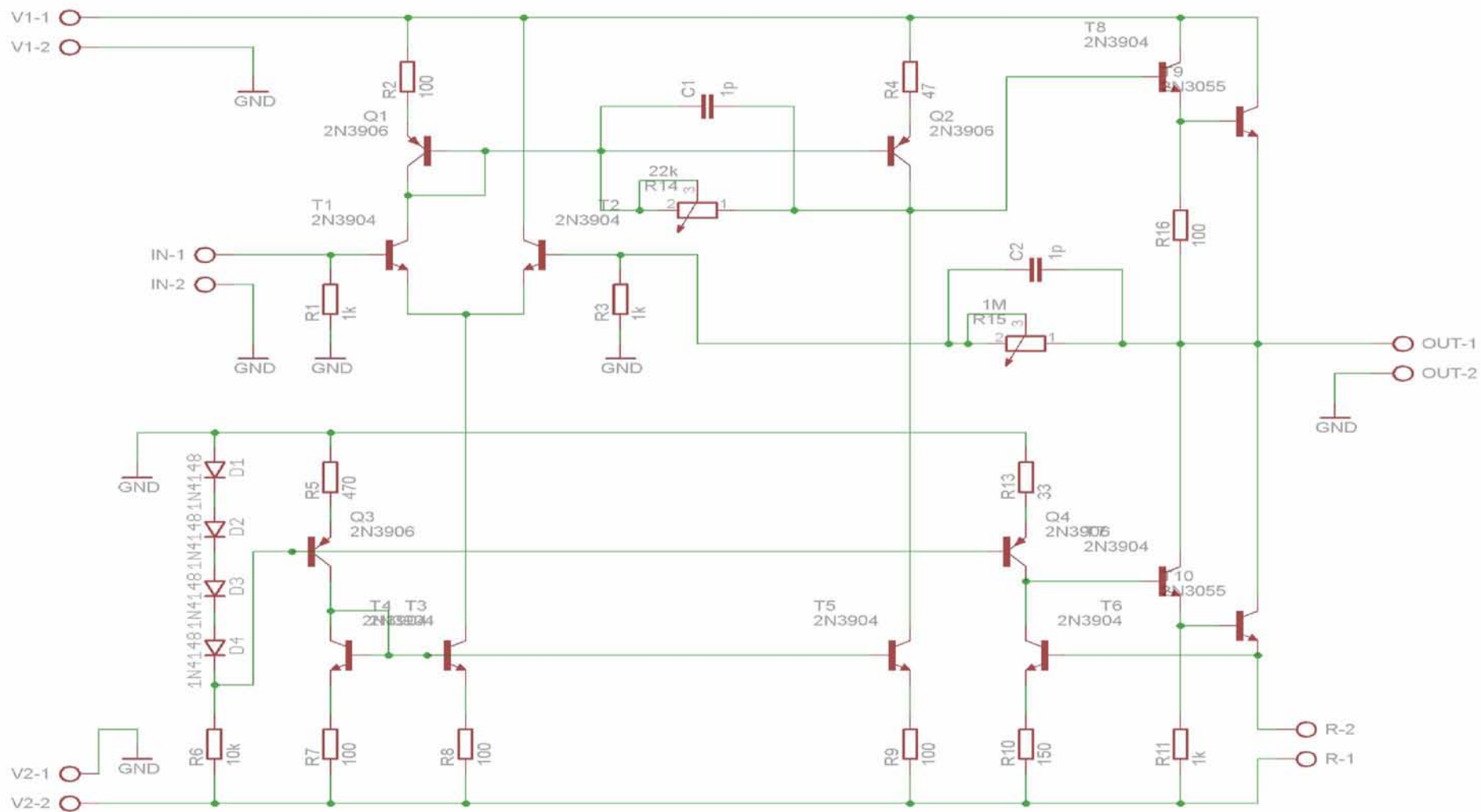


6-1 Σχέδιο ενισχυτή τάξης Α



6-2 Σήματα εισόδου - εξόδου

Για τον σχεδιασμό της πλακέτας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα Eagle 6.1.0. Έτσι θα αναγκαστούμε να σχεδιάσουμε από την αρχή το κύκλωμα στο πρόγραμμα αυτό και να επιλέξουμε το footprint για το κάθε ένα εξάρτημα που θα τοποθετήσουμε. Όσον αφορά την αντίσταση R5 που κατασκευάσαμε θα την τοποθετήσουμε εκτός πλακέτας για να απομακρύνουμε τις υψηλές θερμοκρασίες που θα αναπτύσσει η αντίσταση από την πλακέτα μας. Στην θέση στην πλακέτα θα τοποθετηθούν κλέμμες στις οποίες και θα γίνει η σύνδεση της. Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το σχηματικό της πλακέτας το οποίο σχεδιάστηκε στο schematics του προγράμματος Eagle.

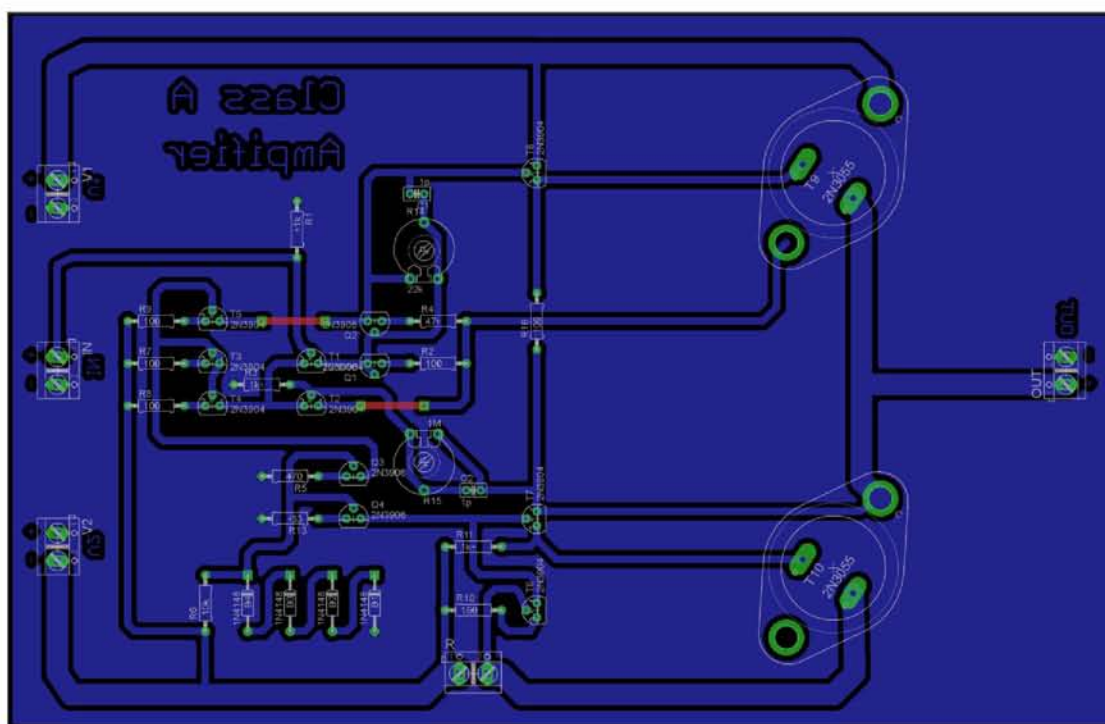


6-3 Σχηματικό ενισχυτή στο Eagle

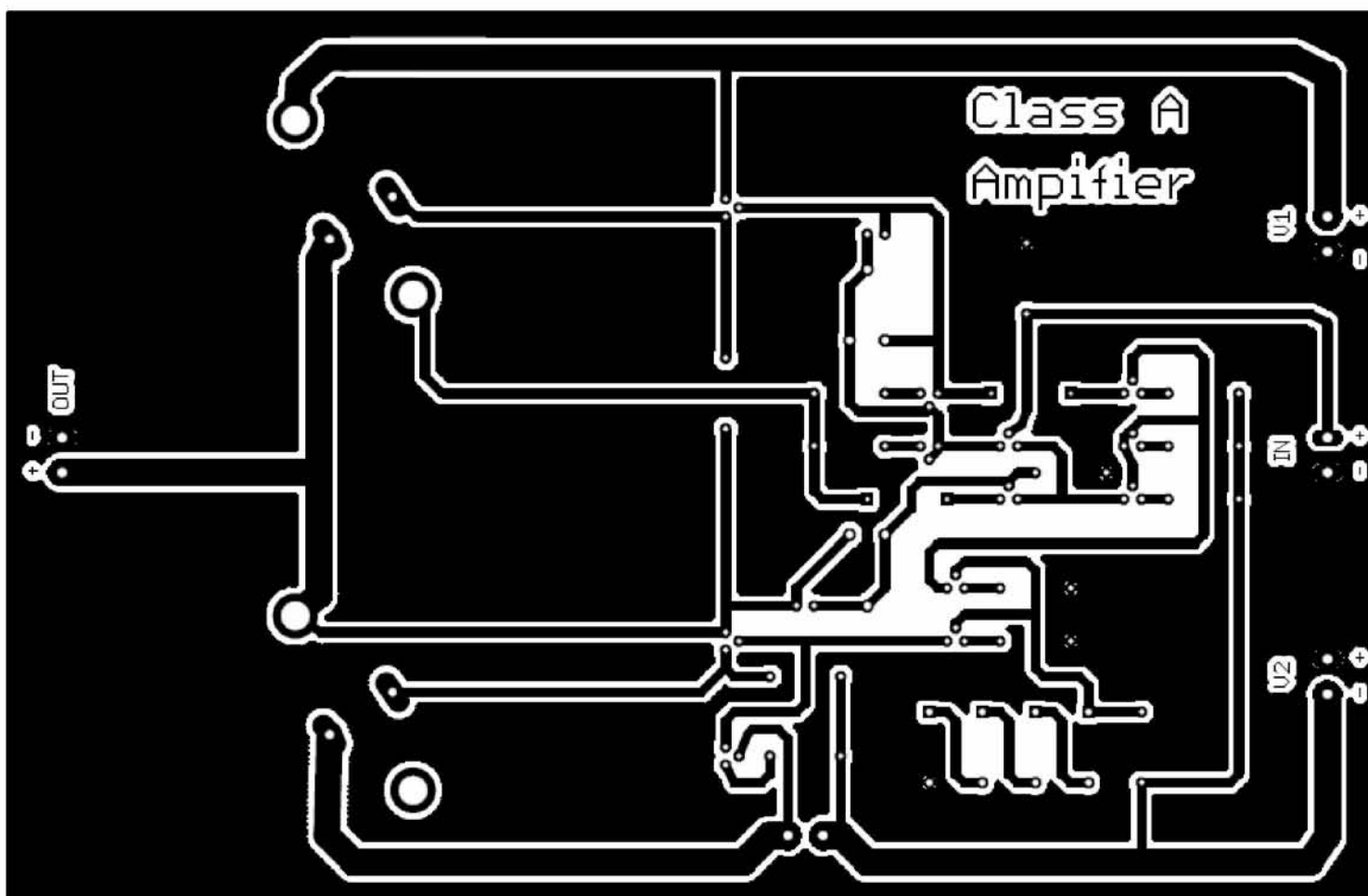


Εφόσον έχουμε σχεδιάσει στο πρόγραμμα το σχηματικό του κυκλώματος πατάμε το κουμπί board και ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο έχουν τοποθετηθεί χύμα όλα τα εξαρτήματα τα οποία και συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια. Στην συνέχεια ορίζουμε τις διαστάσεις της πλακέτας στο επιθυμητό μέγεθος (στην περίπτωση μας 13x20cm) και αρχίζουμε να τοποθετούμε μέσα στον προσχεδιασμένο χώρο όλα τα εξαρτήματα φροντίζοντας να διατηρούμε τις κατάλληλες αποστάσεις και να υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία. Θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε γεωμετρία στην τοποθέτηση των εξαρτημάτων και κυρίως των τρανζίστορ εξόδου τα οποία και βρίσκονται πάνω σε ψήκτρες (θα πρέπει να λάβουμε υπόψη το μέγεθος των ψηκτρών μιας και αυτές δεν φαίνονται στο σχήμα). Επίσης προσοχή χρειάζεται στην τοποθέτηση όλων των υπολοίπων τρανζίστορ. Τα τρανζίστορ του διαφορικού ζεύγους αλλά και όλα όσα αποτελούν καθρέπτη ρεύματος θα πρέπει να τοποθετηθούν πλάτη με πλάτη αλλά και σε πολύ κοντινή απόσταση. Επίσης σε πολύ κοντινή απόσταση θα πρέπει να τοποθετηθούν και τα τρανζίστορ που αποτελούν πηγή ρεύματος προς κάποιο άλλο κύκλωμα. Εφόσον τελειώσουμε με την τοποθέτηση των εξαρτημάτων πατάμε το πλήκτρο Ratnest το οποίο εντοπίζει τις πιο κοντινές διαδρομές για τα καλώδια. Επίσης, επιλέγουμε μέσω του πλήκτρου Polygon να γεμίσει με χαλκό όλος ο αχρησιμοποίητος χώρος της πλακέτας, ο οποίος θα είναι γειωμένος και με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών σημάτων. Τέλος αντικαθιστούμε τα καλώδια που φαίνονται με πίστες χαλκού (κατάλληλης διατομής ανάλογα με το ρεύμα που περνάει σε κάθε σημείο) που σχεδιάζουμε έτσι ώστε να μην τέμνονται μεταξύ του.

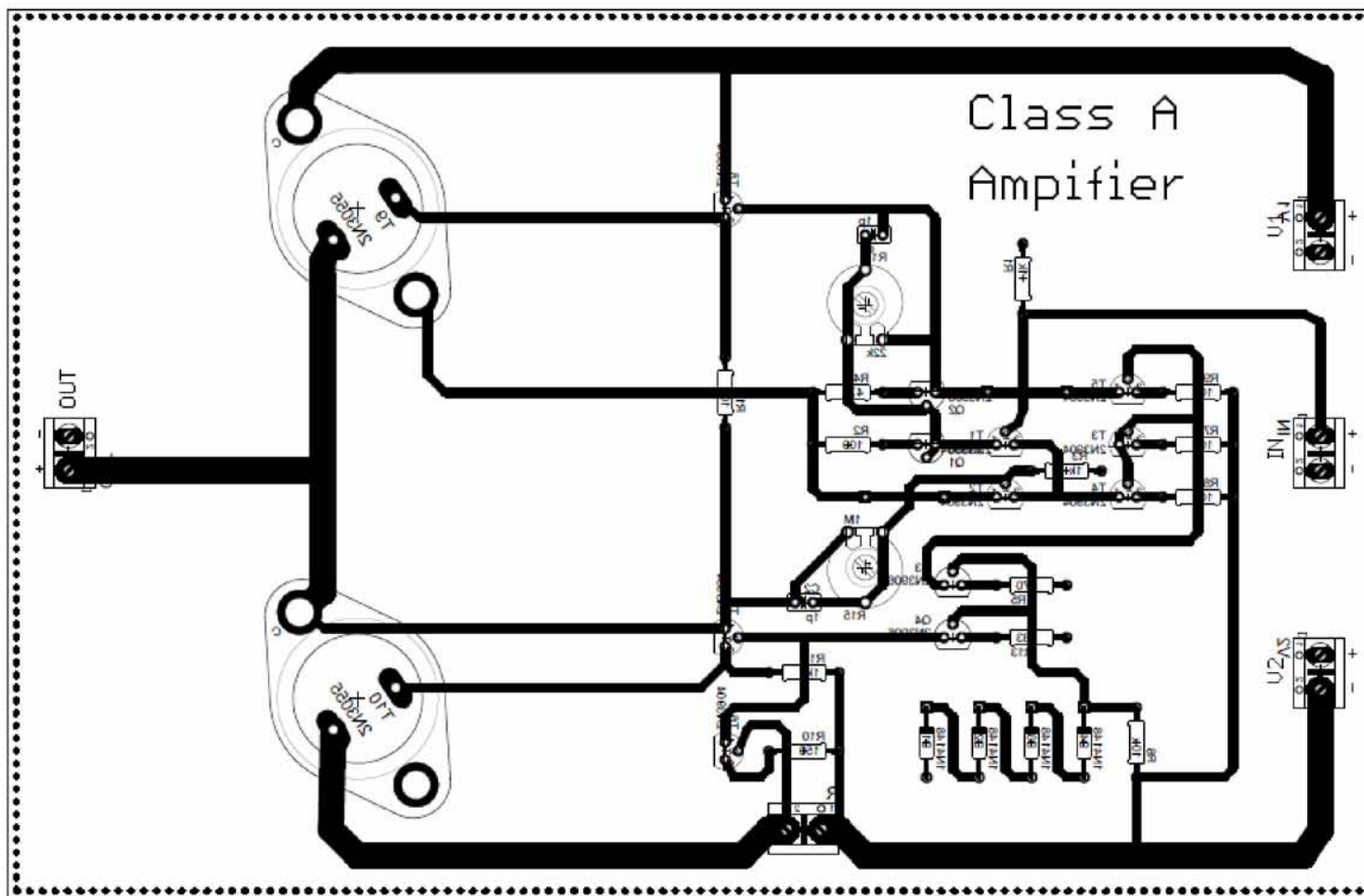
Κατά τον σχεδιασμό της πλακέτας μπορούμε να προχωρήσουμε σε διάφορες αλλαγές και μετακινήσεις των εξαρτημάτων που είχαμε τοποθετήσει στην αρχή έτσι ώστε να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αποφεύγεται να δημιουργείται γωνία στις πίστες 90 μοιρών ή και μικρότερη. Πραγματοποιούμε αλλαγές και μετατρέπουμε τις συγκεκριμένες γωνίες σε αμβλείες έτσι ώστε να υπάρχει ευκολία στην κυκλοφορία του σήματος. Στα σημεία που δεν μπορούμε να περάσουμε πίστες επειδή διακλαδίζονται με άλλες τοποθετούμε πίστα δεύτερου επιπέδου (παριστάνεται με κόκκινη γραμμή), η οποία κατά την κατασκευή της πλακέτας θα αντικατασταθεί με απλό καλώδιο. Παρακάτω δίνουμε το αποτέλεσμα το οποίο και παίρνουμε.



6-4 Layout στο eagle



6-5 Layout σε αναλογία 1-1



6-6 Τοποθέτηση εξαρτημάτων



### 6.1.2. Κατασκευή της πλακέτας

Στο επόμενο βήμα θα κατασκευάσουμε την πλακέτα την οποία έχουμε σχεδιάσει. Το πρώτο βήμα είναι να εκτυπώσουμε το Layout σε ένα glossy χαρτί με έναν εκτυπωτή laser. Στη συνέχεια παίρνουμε μία εποξική πλακέτα χαλκού όπως αυτή της παρακάτω εικόνας και αφού την τρίγουμε έτσι ώστε να καθαρίσει τοποθετούμε πάνω της το χαρτί στο οποίο έχουμε εκτυπώσει το Layout και το σιδερώνουμε για περίπου 10 λεπτά της ώρας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά του toner από το χαρτί πάνω στην πλακέτα.



6-7 Εποξική πλακέτα χαλκού

Πλένουμε καλά την πλακέτα ώστε να ξεκολλήσει καλά όλο το χαρτί και να μείνει πάνω της μόνο το toner. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι το παρακάτω.



6-8 Το αρνητικό της πλακέτας

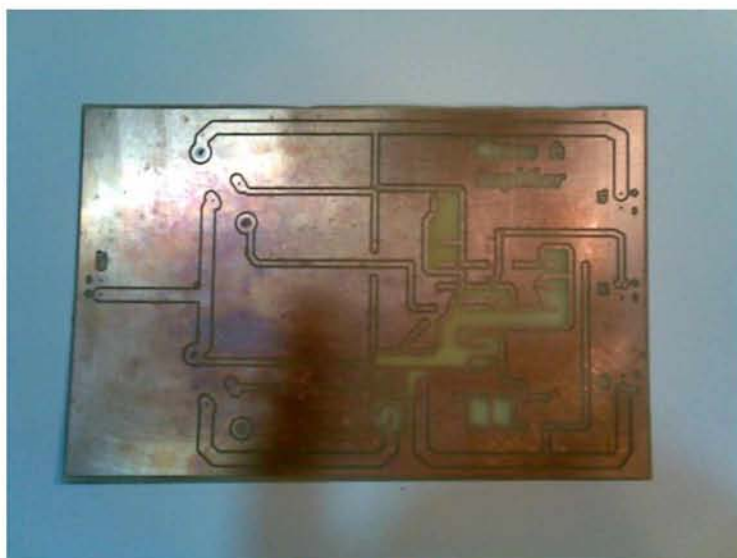


Κατόπιν περνάμε στο επόμενο βήμα της αποχάλκωσης. Θα χρησιμοποιήσουμε τριχλωριούχο σίδηρο τον οποίο και διαλύουμε σε χλιαρό νερό μέσα σε ένα μικρό δοχείο.



6-9 Τριχλωριούχος σίδηρος

Τοποθετούμε μέσα την πλακέτα και την αφήνουμε εκεί για 45 περίπου λεπτά της ώρας. Σε τακτά χρονικά διαστήματα την βγάζουμε έξω από το διάλυμα έτσι ώστε να αερίζεται για να διευκολυνθεί η διαδικασία της αποχάλκωσης. Τέλος πλένουμε την πλακέτα με ένα χημικό για να καθαρίσει από το toner (στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε νίτρο που χρησιμοποιείται ως διαλυτικό μπογιάς) και κάνουμε τρύπες στα αντίστοιχα σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν τα εξαρτήματα.



6-10 Η τελική πλακέτα

Το τελευταίο βήμα που έχουμε να κάνουμε είναι να τοποθετήσουμε τα εξαρτήματα πάνω στην πλακέτα και να τα κολλήσουμε με το κολλητήρι.



6-11 Τα εξαρτήματα

Όλες οι κολλήσεις γίνανε με τον σταθμό κόλλησης ZD-931



6-12 Το εργαστήριο

Το τελικό αποτέλεσμα το οποίο πήραμε είναι το ακόλουθο



6-13 Η πλακέτα του ενισχυτή

## 7. Μέτρηση ενισχυτή τάξης A στο εργαστήριο

Για να μετρήσουμε τον συγκεκριμένο ενισχυτή στο εργαστήριο χρειαστήκαμε ένα τεχνητό ωμικό φορτίο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε μία αντίσταση 4.7 Ohm στα 15 Watt και μία 8.2 Ohm στα 15 Watt επίσης.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος Agilent E3620A. Δυστυχώς το συγκεκριμένο έχει την δυνατότητα να δώσει μόνο μέχρι 1 ampere ρεύμα, οπότε και είχαμε προβλήματα στις μετρήσεις μας. Για τον λόγο αυτό παραλληλίσουμε δύο τέτοιες πηγές που διαθέταμε στο εργαστήριο(χρησιμοποιώντας και τις τέσσερις εξόδους του) και τις χρησιμοποιήσαμε ως την μία πηγή εισόδου του κυκλώματος. Ως δεύτερη πηγή συνεχούς ρεύματος του κυκλώματος μας χρησιμοποιήσαμε μία μπαταρία από ups 12volt/7.2Ah. Και στις δύο πηγές τάσης τοποθετήσαμε κατά σειρά πολύμετρα (στην μέτρηση των Amper) για την μέτρηση της κατανάλωσης. Για την δημιουργία του σήματος εισόδου χρησιμοποιήσαμε την γεννήτρια σήματος Agilent 33220A, ενώ για την απεικόνιση των σημάτων χρησιμοποιήσαμε τον παλμογράφο Tektronix TDS2012. Τα πολύμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα Fluke 175.



7-1 Agilent E3620A

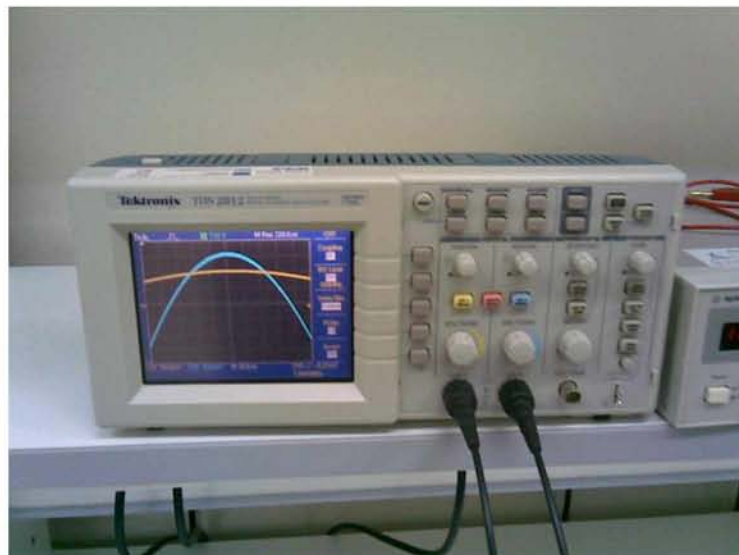


7-2 Fluke 175



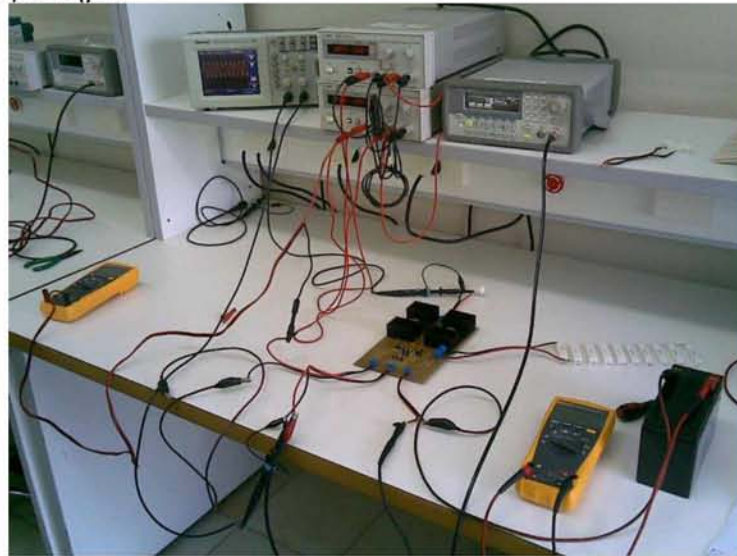


7-3 Agilent 33220A



7-4 Tektronix TDS2012

Τέλος δείχνουμε μία εικόνα από την όλη κυκλωμάτωση κατά την μέτρηση του ενισχυτή στο εργαστήριο



7-5 Μέτρηση στο εργαστήριο

Παρακάτω θα δώσουμε όλες τις μετρήσεις τις οποίες λάβαμε κατά την μέτρηση του ενισχυτή.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι για τους διάφορους υπολογισμούς χρησιμοποιήσαμε τους παρακάτω τύπους:

Για τον υπολογισμό της  $P_{in}$ :

$$P_{in} = V_{in(τροφ)} * I_{in(τροφ)}$$

Για τον υπολογισμό της  $P_{out}$ :

$$V_0 = V_{pp}/2$$

$$V_{RMS} = V_0/\sqrt{2}$$

$$P_{out} = V_{RMS}^2 / R_{Load}$$

Τέλος για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης THD έχουμε:

$$\%THD = 100 * \sum \frac{V_{RMS(i)}^2}{V_{RMS(f_0)}^2}$$

Όπου  $V_{RMS(i)}$  η RMS της  $i$  αρμονικής και  $V_{RMS(f_0)}$  η RMS τιμή της θεμελιώδους. Για την μετατροπή των dB σε volt χρησιμοποιούμε το εξής τύπο:

$$L \text{ in dB} = 20 \log \frac{V}{V_0} \rightarrow V = V_0 * 10^{(L \text{ in dB})/20}, \text{ όπου } V_0 = 0,7746 \text{ volt (0 dB)}.$$

Πραγματοποιήσαμε δύο μετρήσεις. Στην πρώτη χρησιμοποιήσαμε φορτίο 8,2Ωm και στην δεύτερη 4,7Ωm. Και στις δύο περιπτώσεις ρυθμίσαμε το τρίμμερ των 22K στα 4,3K, μιας και εκεί είχαμε καλύτερα αποτελέσματα. Τροφοδοτήσαμε το κύκλωμα από την μπαταρία των 12Volt που είχαμε καθώς και με τα δύο τροφοδοτικά που παραλληλίσουμε. Σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε το σήμα εισόδου ήταν συνεχώς με 0 DC offset. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι διάφορες μετρήσεις που κάναμε με το φορτίο στα 8,2 Ωm.

Είσοδος	Συχνότητα	Έξοδος	Κατανάλωση V1	Κατανάλωση V2	P <sub>in1</sub>	P <sub>in2</sub>	P <sub>in(ολ.)</sub>	P <sub>out</sub>	Απόδοση η
50mV <sub>pp</sub>	1kHz	1V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.015W	0.013%
100mV <sub>pp</sub>	1kHz	2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.06W	0.05%
200mV <sub>pp</sub>	1kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.13W	0.12%
300mV <sub>pp</sub>	1kHz	3.2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.15W	0.14%
500mV <sub>pp</sub>	1kHz	Ο ενισχυτής έχει εισέλθει στον κόρο							
700mV <sub>pp</sub>	1kHz								
50mV <sub>pp</sub>	10kHz	1V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.015W	0.013%
100mV <sub>pp</sub>	10kHz	2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.06W	0.05%
200mV <sub>pp</sub>	10kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.13W	0.12%
300mV <sub>pp</sub>	10kHz	3.2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.15W	0.14%
500mV <sub>pp</sub>	10kHz	Ο ενισχυτής έχει εισέλθει στον κόρο							
700mV <sub>pp</sub>	10kHz								
50mV <sub>pp</sub>	20kHz	1V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.015W	0.013%
100mV <sub>pp</sub>	20kHz	2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.06W	0.05%
200mV <sub>pp</sub>	20kHz	2.5V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.1W	0.09%
300mV <sub>pp</sub>	20kHz	2.9V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.12W	0.11%
500mV <sub>pp</sub>	20kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.14W	0.13%
700mV <sub>pp</sub>	20kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.14W	0.13%
50mV <sub>pp</sub>	30kHz	0.8V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.01W	0.01%
100mV <sub>pp</sub>	30kHz	1.4V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.03W	0.02%
200mV <sub>pp</sub>	30kHz	2.2V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.07W	0.06%



300mV <sub>pp</sub>	30kHz	2.4V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.08W	0.07%
500mV <sub>pp</sub>	30kHz	2.6V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.1W	0.09%
700mV <sub>pp</sub>	30kHz	2.7V <sub>pp</sub>	4.2A	4.8A	50.4W	57.6W	108W	0.11W	0.1%

Παρακάτω δίνουμε έναν πίνακα στον οποίο φαίνονται οι μετρήσεις που πήραμε για τις αρμονικές και γίνεται και υπολογισμός του THD. Η μέτρηση έγινε με φορτίο εξόδου 8,2 Ohm και σήμα εισόδου 100mV<sub>pp</sub> στα 1kHz.

	dB	V <sub>RMS</sub>	V <sub>RMS</sub> <sup>2</sup>
Θεμελιώδες(1kHz)	-1.5	0.6517	0.424
1 <sup>η</sup> αρμονική(2kHz)	-23	0.0548	0.003
2 <sup>η</sup> αρμονική(3kHz)	-31	0.0218	0.0004
4 <sup>η</sup> αρμονική(4kHz)	-41	0.0069	0.00004

$$\%THD = 100 * \sum \frac{V_{RMS(i)}^2}{V_{RMS(f_0)}^2} = 100 * \frac{0.003 + 0.0004 + 0.00004}{0.424} = 100 * \frac{0.00344}{0.424}$$

$$= 100 * 0.0081 = 0.81 \rightarrow \%THD = 0.81$$

Παρακάτω θα δώσουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις που πήραμε για φορτίο 4.7 Ohm.

Είσοδος	Συχνότητα	Έξοδος	Κατανάλωση V1	Κατανάλωση V2	P <sub>in1</sub>	P <sub>in2</sub>	P <sub>in(ολ)</sub>	P <sub>out</sub>	Απόδοση η
50mV <sub>pp</sub>	1kHz	1.2V <sub>pp</sub>	4.2A	5.106A	50.4W	61.27W	111.6W	0.04W	0.035%
100mV <sub>pp</sub>	1kHz	2V <sub>pp</sub>	4.2A	5.106A	50.4W	61.27W	111.6W	0.1W	0.09%
200mV <sub>pp</sub>	1kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	5.106A	50.4W	61.27W	111.6W	0.24W	0.21%
300mV <sub>pp</sub>	1kHz	3.2V <sub>pp</sub>	4.2A	5.106A	50.4W	61.27W	111.6W	0.27W	0.24%
500mV <sub>pp</sub>	1kHz	Ο ενισχυτής έχει εισέλθει στον κόρο							
700mV <sub>pp</sub>	1kHz								
50mV <sub>pp</sub>	20kHz	1V <sub>pp</sub>	4.2A	5.1A	50.4W	61.2W	111.6W	0.026W	0.023%
100mV <sub>pp</sub>	20kHz	1.8V <sub>pp</sub>	4.2A	5.1A	50.4W	61.2W	111.6W	0.086W	0.077%
200mV <sub>pp</sub>	20kHz	2.6V <sub>pp</sub>	4.2A	5.1A	50.4W	61.2W	111.6W	0.18W	0.16%
300mV <sub>pp</sub>	20kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	5.1A	50.4W	61.2W	111.6W	0.24W	0.21%



500mV <sub>pp</sub>	20kHz	3V <sub>pp</sub>	4.2A	5.1A	50.4W	61.2W	111.6W	0.24W	0.21%
700mV <sub>pp</sub>	20kHz	Ο ενισχυτής έχει εισέλθει στον κόρο							

Παρακάτω δίνουμε τον αντίστοιχο πίνακα με τις αρμονικές καθώς και τον υπολογισμό της παραμόρφωσης THD για το φορτίο των 4.7 Ohm με σήμα εισόδου 100mV<sub>pp</sub> στα 100kHz.

	dB	V <sub>RMS</sub>	V <sub>RMS</sub> <sup>2</sup>
Θεμελιώδες(1kHz)	-2.5	0.5808	0.337
1 <sup>η</sup> αρμονική(2kHz)	-26.6	0.036	0.0012
2 <sup>η</sup> αρμονική(3kHz)	-28.5	0.029	0.0008
4 <sup>η</sup> αρμονική(4kHz)	-35	0.013	0.0001

$$\%THD = 100 * \sum \frac{V_{RMS(i)}^2}{V_{RMS(f_o)}^2} = 100 * \frac{0.0012 + 0.0008 + 0.0001}{0.337} = 100 * \frac{0.0021}{0.337}$$

$$= 100 * 0.0062 = 0.62 \rightarrow \%THD = 0.62$$

Παρατηρούμε ότι σχεδόν με το φορτίο στην μισή τιμή από την προηγούμενη έχουμε σχεδόν διπλάσια ισχύ εξόδου και σχεδόν διπλάσια απόδοση και η παραμόρφωση να παραμένει στα ίδια επίπεδα και ελαφρώς μειωμένη.

## Βιβλιογραφία

### Ξένη

1. Pierre-Emmanuel Calmel, Class AD Audio Amplifier, Patent No: US 7,545,212 B2 (2009)
2. Sedra/Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Παπασωτηρίου (1994)
3. N.H.Weste, K.Eshraghian, Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων CMOS VLSI, Παπασωτηρίου (1996)
4. Richard C.Jaeger, Μικροηλεκτρονική, Τζιόλα (2003)
5. C.Randy Slone, High-Power Audio Amplifier Construction Manual, McGraw-Hill (1999)
6. Douglas Self, Audio Power Amplifier Design Handbook, Newnes (2002)
7. Engel Roza, "Poly-Phase Sigma-Delta Modulation", IEEE TRANSACTIONS

### Ελληνική

1. Παναγάκου Κωνσταντίνα, Ενισχυτής Τάξης AD, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών (2012)
2. Ιωάννης Μουρτζόπουλος, Ηλεκτροακουστική Ι, Πανεπιστήμιο Πατρών (2009)
3. Ιωάννης Μουρτζόπουλος, Ηλεκτροακουστική ΙΙ, Πανεπιστήμιο Πατρών (2009)

### Διαδίκτυο

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma_modulation)
2. <http://skywired.net/blog/2011/05/introducing-the-delta-sigma-modulator/>
3. <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf>
4. [http://www.eeweb.com/blog/andrew\\_carter/using-transistor-as-a-switch](http://www.eeweb.com/blog/andrew_carter/using-transistor-as-a-switch)
5. <http://www-personal.engin.umd.umich.edu/~fmeral/ELECTRONICS%20II/01%25c3-Misc%20Notes/Class%20D%20Amplifier.pdf>